

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Instituto de Física e Matemática
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática



Dissertação

Análise de desempenho de trocadores de calor solo-ar aletados com materiais galvanizados

Nibia Raquel Navarro Pastor

Pelotas, 2022

Nibia Raquel Navarro Pastor

Análise de desempenho de trocadores de calor solo-ar aletados com materiais galvanizados

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática

Orientador: Prof. Dr. Jairo Valões de Alencar Ramalho
Coorientador: Prof. Dr. Honório Joaquim Fernando

Pelotas, 2022

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

P293a Pastor, Nibia Raquel Navarro

Análise de desempenho de trocadores de calor solo-ar aletados com materiais galvanizados / Nibia Raquel Navarro Pastor ; Jairo Valões de Alencar Ramalho, orientador ; Honório Joaquim Fernando, coorientador. — Pelotas, 2022.

71 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Trocadores de calor solo-ar (TCSAs). 2. Potencial térmico de TCSA. 3. Potencial térmico do solo. 4. Eficiência térmica de TCSA. 5. TCSA aletados. I. Ramalho, Jairo Valões de Alencar, orient. II. Fernando, Honório Joaquim, coorient. III. Título.

CDD : 536.4

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE TROCADORES DE CALOR SOLO-AR
ALETADOS COM MATERIAIS GALVANIZADOS**

por

Nibia Raquel Navarro Pastor

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, PPGMMat do Instituto de Física e Matemática da Universidade Federal de Pelotas, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Modelagem Matemática

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jairo Valões de Alencar Ramalho – Orientador (UFPel)

Prof. Dr. Honório Joaquim Fernando – Co-Orientador (UFF)

Prof. Dr. Régis Sperotto de Quadros (UFPel)

Prof. Dr. Michel Kepes Rodrigues (FURG)

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (UFRGS)

Pelotas, 04 de março de 2022

AGRADECIMENTOS

O prazer que sinto ao perceber que tenho que agradecer a muitas pessoas é indescrevível, mesmo que isso implique cometer alguma omissão.

Ao principal responsável por ter trilhado este caminho mobilizador, meu caro colega e amigo Rafael Burlón. Sem o convite dele eu não teria tido a oportunidade de me aventurar na modelagem matemática. O aprendizado que alcançamos juntos compensou e superou as dificuldades que não paravam de aparecer.

À minha família e amigos que, sem entender com o que eu estava lidando todo esse tempo, me apoiaram de várias maneiras, principalmente com carinho.

Aos meus queridos colegas de mestrado: Ana Maria Domingues, Leonardo Alves, Rafael Zanovelo, Gesiéle Santos, Natália Barros, Eduardo Nóbrega, Viliam Cardoso, Lucas Tadeu, Anderson Donay, Dominiki Ribas e Patrick Garcia. Todos eles me fizeram sentir parte de algo importante e nunca hesitaram em me encorajar, estudar comigo, me ensinar ou simplesmente conversar comigo, apesar da óbvia diferença geracional.

Aos professores do PPGMMat que dedicaram seu tempo para me surpreender com seu conhecimento e compreensão: Glênio Aguiar Gonçalves, Guilherme Janecke Weymar, Gustavo Maia Souza, Ruth da Silva Brum, Régis Sperotto de Quadros e Daniela Buske.

Aos professores que compõem a Banca que fizeram correções detalhadas para que eu possa continuar vendo mais longe.

Aos meus colegas do Instituto de Formação Docente de Rivera (IFD) e da Universidade Tecnológica do Uruguai (UTEC), que nunca hesitaram em aliviar minhas tarefas para que eu pudesse estudar; menção especial para Alice Pérez e Fabián Fontoura.

Às duas instituições, IFD e UTEC, onde trabalho com orgulho, que me apoiaram de várias maneiras para que eu pudesse continuar me profissionalizando. Um agradecimento especial a Juan Díaz que fez milagres com meus horários para que eu pudesse fazer os cursos presencialmente quando estavam nessa modalidade. Também não posso deixar de citar o Engenheiro Dr. Martín Pomar, que enquanto esteve presente não deixou de me encorajar a seguir em frente.

Na minha longa vida, nunca sonhei em conhecer pessoas que se dedicassem a ensinar com tanto profissionalismo, paciência, compreensão, sabedoria, senso crítico e bom humor; enfim, com tanta humanidade. Esses gigantes são o Dr. Jairo Valões de Alencar Ramalho e o Dr. Honório Joaquim Fernando. Eles me levaram ao mundo dos fenômenos físicos, das simulações, das pesquisas científicas, da leitura e publicação de artigos como a uma criança descobrindo um país encantado.

Se consegui enxergar mais longe, foi porque me apoiei nos ombros de gigantes.

ISAAC NEWTON

RESUMO

NAVARRO PASTOR, Nibia Raquel. **Análise de desempenho de trocadores de calor solo-ar aletados com materiais galvanizados**. 2022. 69 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

Os trocadores de calor solo-ar, TCSA, se apresentam como uma tecnologia alternativa para fornecer energia térmica usando uma fonte renovável; com eles é possível resfriar o ar de uma edificação no verão e aquecê-lo no inverno, tirando vantagem da inércia térmica do solo. A capacidade de aquecimento e resfriamento dos TCSA, depende de fatores tais como o clima local, as propriedades do solo e a configuração da instalação. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho térmico do TCSA introduzindo materiais galvanizados. A ideia é aumentar a troca de calor entre o duto e o solo ao redor, já que os materiais galvanizados têm uma condutividade térmica maior do que a do solo. O desempenho térmico dos TCSA é avaliado através de seu potencial térmico e sua eficiência. As simulações para o desenvolvimento deste trabalho usam um modelo analítico, unidimensional, *Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern* conhecido (GAEA) que calcula a temperatura do ar no duto do TCSA estimando coeficientes de transferência de calor entre o ar, a parede do duto e o solo, partindo das propriedades termofísicas do material do duto, do ar em escoamento e do solo circundante. A temperatura do solo é calculada resolvendo o problema de transferência de calor em duas dimensões através de uma combinação dos métodos de diferenças finitas e de elementos finitos. Foi adotado como contexto físico deste trabalho a cidade de Viamão, no sul do Brasil, dado que suas condições climáticas e de solo são acessíveis através de publicações referentes à uma instalação experimental ali construída. Os resultados mostram que o potencial térmico dos TCSA é melhorado em 33%, equipando os dutos com o bloco e as aletas galvanizadas, assim como a sua eficiência que atinge quase 95%. Com a mesma metodologia, foi estimado o desempenho dos TCSA variando a profundidade da instalação obtendo resultados em consonância com a literatura recente, valores próximos a 3 m são recomendáveis. Complementarmente foi feito um estudo considerando o aumento da condutividade térmica da região ao redor do duto e seu efeito no desempenho de TCSA resultando que tal incremento deve ser feito na direção do aumento da profundidade.

Palavras-chave: Trocadores de calor solo-ar (TCSAs), Potencial térmico de TCSA, Potencial térmico do solo, Eficiência térmica de TCSA, TCSA aletados.

ABSTRACT

NAVARRO PASTOR, Nibia Raquel. **Performance analysis of ground-to-air finned heat exchangers with galvanized materials**. 2022. 69 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

Soil-to-air heat exchangers, EAHE, present themselves as an alternative technology to provide thermal energy using a renewable source; with them it is possible to cool the air in a building in the summer and heat it in the winter, taking advantage of the thermal inertia of the ground. The heating and cooling capacity of EAHE depends on factors such as the local climate, soil properties and installation configuration. This work aims to evaluate the thermal performance of EAHE introducing galvanized materials. The idea is to increase the heat exchange between the duct and the surrounding soil, as galvanized materials have a higher thermal conductivity than the soil. The thermal performance of EAHE is evaluated through their thermal potential and efficiency. The simulations for the development of this work use an analytical, one-dimensional, *Graphische Auslegung von Erdwärme Austausch-known* (GAEA) model that calculates the air temperature in the EAHE duct by estimating heat transfer coefficients between the air, the duct wall and the soil, based on the thermophysical properties of the duct material, the flowing air and the surrounding soil. Soil temperature is calculated by solving the heat transfer problem in two dimensions through a combination of finite difference and finite element methods. The city of Viamão, in southern Brazil, was adopted as the physical context of this work, given that its climatic and soil conditions are accessible through publications referring to an experimental installation built there. The results show that the thermal potential of EAHE is improved by 33%, equipping the ducts with the galvanized block and fins, as well as its efficiency that reaches almost 95%. Using the same methodology, the performance of the EAHE was estimated varying the depth of the installation, obtaining results in line with recent literature, values close to 3 m are recommended. In addition, a study was carried out considering the increase in the thermal conductivity of the region around the duct and its effect on the performance of EAHE, resulting that such increase must be done in the direction of increasing depth.

Keywords: Earth-air heat exchangers (EAHE), EAHE thermal potential, Soil thermal potential, EAHE thermal efficiency, Finned EAHE.

LISTA DE FIGURAS

1	Esquema básico de um TCSA	15
2	Variáveis e parâmetros de um TCSA.	20
3	Domínio computacional 2D.	23
4	Domínio computacional 3D.	23
5	Modelagem do TCSA.	26
6	Volume finito sob ação de um fluxo de calor ϕ . Notação e definições.	28
7	TCSA sob efeito único das condições climáticas.	30
8	Heurística do MEF para problemas transientes.	33
9	Ilustração do domínio espacial $\Omega :=]0, l_x[\times]0, l_z[$ de fronteira $\partial\Omega$	37
10	Corte transversal de uma configuração geométrica do problema.	45
11	Exemplos de teste de malha em GMSH.	46
12	Subdomínios definidos com GMSH.	47
13	Malha selecionada com 3935 elementos.	48
14	Comparação dos resultados do modelo atual com dados experimentais e outros resultados numéricos.	51
15	Campos de temperatura média diária do solo no verão e inverno.	52
16	Campos de temperatura média diária do solo no outono e primavera.	53
17	Configurações para o duto, o bloco e as aletas.	54
18	Sem material galvanizado - caso 0.	56
19	Com material galvanizado - caso 3.	56
20	Exemplo do domínio computacional com disco galvanizado.	58
21	Campos de temperatura para $A = 5\%$	59
22	Campo de temperatura para $A = 0.1\%$	59
23	Comparação entre as temperaturas anuais do ar e da saída.	60
24	Temperaturas anuais comparativas a diferentes profundidades.	62

LISTA DE TABELAS

1	Propriedades termofísicas do solo, do ar e dos materiais galvanizados.	23
2	Dados finais dos testes de malha	48
3	Valores RMS anuais do potenciais térmico do solo e do TCSA para os diferentes casos	55
4	Resultados com a variação do disco galvanizado.	59
5	Ganhos relativos dos valores eficazes anuais (RMS) para o potencial térmico do solo variando a profundidade de um em um metro. .	61
6	Ganhos relativos de meio em meio metro.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

EAHE	<i>Earth-air heat exchangers</i>
GAEA	<i>Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern</i> (Desenho gráfico de trocadores de calor geotérmicos)
GMSH	<i>Generation Mesh</i>
MEF	Método de elementos finitos
PVIC	Problema de valor inicial e de contorno
RMS	Raiz do valor médio quadrático
TCSA	Trocadores de calor solo-ar

Nomenclatura

A	Área (m^2)
c_p	Calor específico (J/kg K)
C^0	Espaço das funções contínuas
D_0	Diâmetro do duto (m)
h	Coeficiente de convecção (W/m^2K)
K_j	Elementos triangulares fechados
I_{τ_0}	Domínio temporal
I_n	Intervalo de tempo
L_0	Comprimento do duto (m)
l_x	Comprimento na direção x
l_z	Comprimento na direção z
\dot{m}	Vazão do ar (kg/s)
\hat{n}	Vetor normal unitário (adimensional)
N_u	Número de Nusselt (adimensional)
P_r	Número de Prandtl (adimensional)

$\mathbb{P}_k(K)$	Espaço dos polinômios de grau igual ou inferior a $k > 0$ em cada elemento K da triangulação \mathcal{T}_h
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor (W)
Re	Número de Reynolds (adimensional)
t	Tempo (s ou dias)
T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$ ou K)
\mathcal{T}_h	Uma triangulação de dimensão h
U^*	Relação de condutâncias (adimensional)
U_L	Coeficiente de transferência de calor por comprimento (W/m K)
v	Velocidade do escoamento (m/s)
V	Volume (m^3)
x	Coordenada espacial cartesiana (m)
x_0	Abscissa do centro do duto (m)
y	Coordenada espacial cartesiana (m)
z	Coordenada espacial cartesiana (m)
z_0	Profundidade do duto (m)
$ \cdot $	Norma euclidiana usual

Letras gregas

α	Difusividade térmica (m^2/s)
Γ_i	Partes do domínio espacial
Γ_D	Fronteira com condições de contorno do tipo Dirichlet
Γ_N	Fronteira com condições de contorno do tipo Neumann
Δx	Tamanho de segmento
Δt	Tamanho de um intervalo de tempo
ζ	Profundidade máxima (m)
λ	Condutividade térmica (W/m K)
ρ	Massa específica (kg/m^3)
τ_0	Período (s ou dias)
ϕ	Fluxo de calor (W/m^2)
Ω	Domínio espacial
∇	Operador gradiente
∇^2	Operador laplaciano

Subscritos ou Sobrescritos

<i>a</i>	Ar
<i>c</i>	Correção
<i>ent</i>	Entrada do duto
<i>k</i>	Índice
<i>s</i>	Solo
<i>sai</i>	Saída do duto
<i>w</i>	Parede do duto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Revisão de literatura	16
1.2	Objetivos	20
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.3	Organização do trabalho	21
2	METODOLOGIA	22
2.1	Dados gerais	22
2.2	Modelagem matemática dos TCSA	24
2.3	Modelagem matemática da temperatura no solo	27
2.4	Resolução numérica	32
2.4.1	Descrição geral do MEF	32
2.4.2	Definições e notações	33
2.4.3	Descrição do problema	36
2.4.4	Implementação do MEF	37
2.4.5	Aspectos da implementação computacional	43
2.5	Malhas	44
2.5.1	Geração	44
2.5.2	Testes	47
2.6	Parâmetros de estudo	48
3	RESULTADOS	51
3.1	Validação e verificação do modelo	51
3.2	Introdução do bloco e das aletas galvanizadas	53
3.3	Efeito de adicionar o bloco e a aleta	55
3.4	Estudo do enriquecimento da condutividade térmica	57
3.5	Variação da profundidade da instalação usando uma aleta	61
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Grande parte da energia usada em todo o mundo vem de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural. O consumo desses combustíveis é mais rápido do que sua regeneração, por isso tais recursos são considerados não renováveis. Além disso, a queima desses combustíveis emite grande quantidade de gases de efeito estufa para atmosfera, agravando o aquecimento global. Mais especificamente, os edifícios são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo global de energia assim como também de um terço das emissões totais de gases com efeito estufa. A maior parte dessa energia é utilizada para aquecimento e resfriamento do ambiente o que faz que o uso de sistemas convencionais de ar condicionado dos edifícios tenham um impacto energético e ambiental significativo, como o aumento das emissões de dióxido de carbono e aquecimento global (MIHALAKAKOU ET AL., 2022).

A comunidade científica e técnica mundial vem fazendo esforços na pesquisa de tecnologias que ofereçam soluções energeticamente eficientes, baseadas em fontes de energia renováveis que contribuam simultaneamente na a diminuição do consumo de energia e na proteção do meio ambiente.

No Brasil, mais de 60% da matriz energética é baseada em hidrelétricas, que pode ser considerada uma fonte renovável e limpa (DOMINGUEZ ET AL., 2020). Porém, períodos de seca provocam crises cíclicas, em padrões de 10 – 15 anos, na geração de energia (HUNT ET AL., 2018). Embora a exploração de outras fontes renováveis, como a eólica e solar, tenha crescido significativamente nos últimos anos, o Brasil aumentou também o uso de usinas termelétricas (ocupando cerca de 25% da produção nacional) que consomem predominantemente combustíveis fósseis e biomassa (CAMPOS ET AL., 2020). Em particular, há um consumo de carvão em grande escala na Usina Termelétrica de Candiota, na cidade de Candiota, no Rio Grande do Sul (PIRES AND QUEROL, 2004).

Outro fato importante a ser considerado é o seguinte:

A busca dos brasileiros por uma temperatura confortável em casa ou no trabalho coloca o País como o quinto maior consumidor de aparelhos de ar-condicionado do mundo. Dados do Ministério de Minas e Energia mostram que entre os anos de 2005 e 2017 apenas o setor residencial brasileiro mais que duplicou a posse desses equipamentos, tendo aumentado sua participação no consumo total de energia elétrica dentro das casas de 7%, em 2005, para 14% em 2017. Diante da necessidade de reduzir o consumo de energia elétrica com ar-condicionado no Brasil, o sistema baseado na troca de energia térmica com o subsolo a partir das fundações pode ser uma alternativa aos tradicionais sistemas de climatização.

(SEMBAY, 2021)

A troca de energia térmica com o subsolo tem o sol como fonte de energia enquanto a camada superficial do solo atua como uma grande reserva inercial dessa energia, com ciclos alternados de armazenamento e fornecimento de calor ao meio ambiente; ou seja, a região próxima à superfície do solo pode se tornar uma fonte de calor ou sumidouro (HERMES ET AL., 2020). No ciclo diário, a superfície da terra ganha calor durante o dia e perde à noite; da mesma forma, no ciclo anual, ganha calor nos períodos quentes e perde nos períodos frios (VAZ, 2011; BRUM, 2016).

Uma instalação de TCSA, consiste em um ou mais dutos enterrados no solo por onde o ar que provem do exterior escoa forçado pela ação de ventiladores ou outro tipo de soprador. Esses dutos são instalados em profundidades relativamente pequenas, possibilitando a troca de calor entre o solo e o ar em escoamento. Assim os TCSAs utilizam a energia térmica acumulada no subsolo. Como a temperatura das camadas superficiais do solo é sempre mais amena que a temperatura do ar externo ambiente, o ar que sai do TCSA se mistura com ar interior de ambientes construídos para melhorar a sua condição térmica (RODRIGUES ET AL., 2015; MIHALAKAKOU ET AL., 2022). O esquema básico de um TCSA com um duto pode ser visto na Fig. 1.

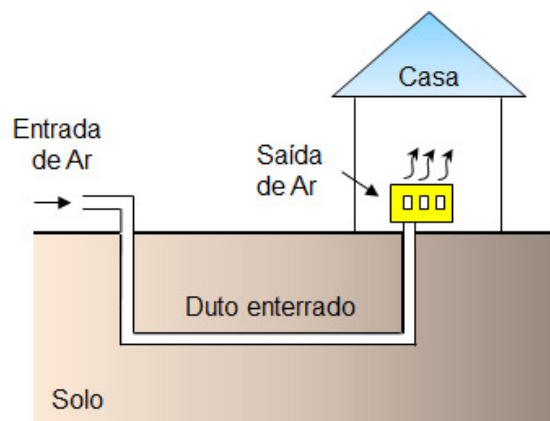


Figura 1: Esquema básico de um TCSA

Neste trabalho é estudado um TCSA com um duto reto, horizontal, envolto por um bloco galvanizado conectado a um máximo de quatro aletas, com o mesmo comprimento. Analisa-se doze configurações dessas aletas, inspiradas em Hassanzadeh et al. (2018), adaptadas às condições de Viamão, cidade brasileira que tem clima subtropical e da qual há relatórios de uma instalação experimental de um TCSA. Como parâmetros de estudo do desempenho são usados P_t e P_s , potencial do solo e do TCSA, respectivamente. As alterações de tais parâmetros também são examinados em função da profundidade da instalação.

Assume-se que no solo as variações de temperatura na direção longitudinal (do duto) são desprezíveis e com tal suposição estima-se as temperaturas do solo com uma abordagem de modelagem 2D. As temperaturas em várias partes do duto, incluindo a saída, são obtidas com um modelo unidimensional (GAEA) que calcula analiticamente os coeficientes de transferência de calor para estimar as trocas de calor entre o ar, as paredes do duto e o solo.

Observação 1.0.1. *Neste trabalho, todas as figuras são da autora.*

1.1 Revisão de literatura

Artigos como Bordoloi et al. (2018); Agrawal et al. (2019); Mihalakakou et al. (2022) cobrem extensivamente o estado da arte dos TCSAs. Muitos trabalhos enfocam a modelagem do fenômeno de transferência de calor, que se estabelece entre o ar, o duto e o solo, buscando melhorar o desempenho térmico do sistema, que depende de diferentes parâmetros (PAEPE AND JANSSENS, 2003; ASCIONE ET AL., 2011; BISONIYA, 2015; PAPAKOSTAS ET AL., 2019).

O resfriamento e aquecimento a partir da variação de temperatura do solo é uma das técnicas passivas mais documentada, de aplicação crescente. A determinada profundidade, dependendo da localização geográfica, a temperatura torna-se quase constante, alcançando a temperatura média anual da região da instalação. O conhecimento das flutuações diárias e anuais da temperatura do solo (na superfície e no seu interior) é requisito básico para a modelagem e avaliação do desempenho térmico do TCSA. A consideração deste parâmetro tem levado ao desenvolvimento de muitos modelos para simular e prever o comportamento dos TCSAs. Em Mihalakakou et al. (2022) pode-se encontrar uma classificação desses modelos: usando métodos numéricos, usando métodos analíticos e usando modelos baseados em dados. Os mesmos autores também fazem uma classificação dos parâmetros que mais influenciam o desempenho térmico dos TCSAs em: a) parâmetros de projeto do sistema (material, quantidade, diâmetro, comprimento, profundidade de instalação dos dutos); b) tipos de solo descritos pelas suas características termo-físicas e c) parâmetros ambientais (radiação, transferência de calor por convecção, velocidade do vento, vegetação e co-

bertura da superfície e a velocidade de evaporação/condensação). Outros autores, como por exemplo Brum et al. (2013b) falam de parâmetros operacionais e construtivos.

No Brasil, o aproveitamento do potencial energético do solo, com o uso dos TC-SAs, para se obter temperaturas mais confortáveis, permitiria acondicionar edifícios nas épocas mais frias e mais quentes. Um estudo sobre isso é oferecido por Alves and Schmid (2015) que teve por objetivo explorar o potencial de aquecimento e resfriamento do solo para aplicação do TCSA, considerando a classificação bioclimática do território brasileiro e descrevendo a influência da profundidade (entre 0,5 m e 4 m) e do tratamento da superfície do solo (considerou-se o efeito de camadas de concreto e grama na superfície do solo). O estudo buscou avaliar a viabilidade dos TCSA em um clima tropical, onde a amplitude da temperatura anual tende a ser menor e a média das temperaturas é mais alta do que nas zonas temperadas do sul. Um dos pontos de apoio para as comparações feitas está no conceito de demanda em °C/h para prever o potencial de aquecimento e resfriamento. Esse cálculo permite visualizar diferenças entre as oito zonas bioclimáticas, distinguindo quais apresentam maior demanda de resfriamento daquelas que apresentam maior demanda de aquecimento. Embora uma das conclusões do estudo tenha sido que a 4,0 m de profundidade o potencial de condicionamento térmico é ótimo para todas as regiões, também reportou-se que, quando o objetivo é resfriar uma edificação em áreas mais quentes, a superfície do solo coberto com grama permite a utilização de profundidades menores com uma diminuição insignificante do potencial térmico, devido à estabilidade da temperatura da superfície à sombra da grama. Se a superfície é coberta de concreto o potencial de aquecimento satisfaz todas as demandas a 4,0 m. Este estudo teórico conclui, de forma mais genérica, que o tratamento da superfície do solo pode ser uma ferramenta útil para aumentar o potencial térmico de um TCSA, abrindo uma gama de aplicações que aproveitariam, por exemplo, grandes estacionamentos asfálticos ou áreas ajardinadas dependendo se a demanda é de aquecimento ou resfriamento, respectivamente. A recomendação é que esse tipo de sistema também seja explorado nas regiões mais quentes, úmidas ou secas do Brasil, onde pode ser uma estratégia útil para resfriar edifícios com baixo consumo de energia.

Ao fazer uma avaliação do uso de TCSA sob condições climáticas da França e do Brasil, Estrada et al. (2018) estimaram que há locais em zonas tropicais (como Rio de Janeiro) onde o sistema pode resfriar o ar, porém, para compensar as condições de umidade é necessário gastar muita energia para manter o conforto térmico. Já em zonas subtropicais, como é o caso do Sul do Brasil, a umidade local não é um empecilho. Nesse ponto, deve-se destacar o trabalho feito por VAZ (2011) como um dos pioneiros para medir o potencial térmico dos TCSA no Rio Grande do Sul. Ele obteve importantes resultados experimentais em uma instalação construída na cidade

gaúcha de Viamão ($30^{\circ} 04' 51''\text{S}$; $51^{\circ} 01' 24''\text{W}$), os quais têm contribuído para diferentes estudos nacionais. Esse é o caso da presente pesquisa que foi realizada nas condições da referida cidade. Tais dados serviram de base nesse trabalho para obter propriedades do clima e solo de Viamão; além de definições iniciais de parâmetros, como as especificações do duto e sua profundidade.

Dentre outros trabalhos nacionais que apresentam a análise dos parâmetros do TCSA para aumentar seu potencial térmico e trocas de calor, cita-se Domingues et al. (2021) que avaliaram três locais da cidade de Rio Grande, no Rio Grande do Sul. O trabalho promoveu avanços as pesquisas apresentadas em Hermes et al. (2020); Rodrigues et al. (2018). Seus resultados indicam que a maior parte do potencial térmico pode ser alcançado em profundidades relativamente rasas, menores que 3 m, com picos de até 5°C , e atingindo eficiências anuais acima de 90%. O trabalho considerou variações da velocidade do ar, comprimento e diâmetro dos dutos. Os maiores aumentos de potencial térmico foram alcançados usando: um comprimento do duto de 50 m, ou reduzindo o diâmetro do duto para 0,05 m, ou reduzindo a velocidade do ar para 1,0 m/s. Contudo, apenas o aumento no comprimento do duto também permitiu aumentar satisfatoriamente as quantidades anuais de calor trocadas. Uma inovação do trabalho foi a apresentação de uma metodologia para considerar as diferentes camadas do solo utilizando apenas um modelo unidimensional. Ainda no Rio Grande do Sul, cabe citar o trabalho de Nóbrega et al. (2020), cobrindo as primeiras estimativas do potencial térmico de TCSA na cidade de Pelotas.

Em Bordoloi et al. (2018); Agrawal et al. (2019), foi estudado como os diversos parâmetros do projeto afetam direta ou inversamente a temperatura de saída dos TCSA. Por exemplo, a redução de temperatura do ar no TCSA é diretamente proporcional a condutividade térmica do solo e ao comprimento do duto, mas é inversamente proporcional á velocidade de escoamento do ar e ao diâmetro do duto. Nota-se que o efeito das mudanças nos materiais dos tubos é bem menor do que o produzido pela variação de outros parâmetros. Embora se constate uma superioridade do duto galvanizado em relação, por exemplo, ao de PVC, devido às diferenças na condutividade térmica, a variação de temperatura é pouco afetada. Em geral, o desempenho do TCSA depende da profundidade do duto, do seu comprimento e diâmetro, da difusividade térmica do solo, da temperatura ambiente e da velocidade do escoamento do ar. Observa-se também que a superfície do solo pode ser resfriada, por exemplo, aumentando a vegetação local; isso proporciona um aumento dos potenciais de resfriamento como foi apresentado por Alves and Schmid (2015).

Outro aspecto relevante é a configuração da instalação, ou seja, a forma como os dutos estão dispostos no solo. Nesse sentido, cita-se o trabalho de Brum et al. (2019) que realizaram investigações numéricas sobre diferentes configurações geométricas do TCSA compostas por até cinco dutos. Cabe ressaltar que o aumento do número

de dutos foi acompanhado pela redução dos diâmetros para manter a vazão de ar constante. Os melhores resultados ocorreram com o aumento do volume ocupado pela instalação. Possibilidades de ganho no desempenho térmico do TCSA foram observadas com o aumento do número de dutos, embora tenha se notado uma saturação, pois foi possível obter melhores resultados com quatro dutos, ao invés de cinco, dependendo da configuração da instalação.

Seguindo outra estratégia para melhorar o desempenho térmico de um TCSA, cita-se o trabalho de Platts et al. (2015) onde a baixa condutividade térmica e difusividade do solo são apontadas como limitações importantes para a instalação de TCSAs. A adição de umidade nas proximidades do duto aumenta seu desempenho térmico, mas a umidade varia com o tempo. Portanto Platts et al. (2015) utilizaram uma membrana de polietileno para envolver o duto e areia de quartzo saturada com água para preservar a umidade do solo nas proximidades do duto. Foi observado que a eficiência do sistema com membrana de polietileno pode ser maior do que sem a membrana. Os autores propuseram uma análise teórica da viabilidade do acoplamento de um sistema de membrana ao TCSA convencional para aumentar a condução de calor. A proposta foi acoplar ao duto, de polietileno de alta densidade, areia de quartzo saturada e enrolar o duto e a areia com uma membrana com as mesmas propriedades do duto para solucionar o problema da migração de umidade. Suas simulações tomaram como cenário uma casa em um município australiano sob a demanda por resfriamento. O estudo paramétrico procurou determinar a influência do tamanho do sistema acoplado, especificamente o diâmetro da membrana no TCSA convencional. Foram avaliados três diâmetros: 300, 600 e 1200 mm. Ao serem considerados todos na mesma profundidade, o duto do TCSA convencional, sem acoplamento da membrana, fica mais ao fundo da escavação pois nos outros casos o duto encontra-se no centro da membrana. Os resultados sugerem uma vantagem do duto acoplado com a membrana em comparação com o duto assentado diretamente em solos de baixa condutividade; essa vantagem diminui quando a condutividade aumenta. Nos casos estudados foram alcançados aumentos de eficiência de até 150%.

Um trabalho particular, que motivou esta pesquisa, foi o de Hassanzadeh et al. (2018), que explorou a ideia de aumentar a troca térmica do TCSA integrando os dutos com aletas (Incropera et al., 2008). Os autores examinaram numericamente seis configurações, variando o número de aletas e a disposição das mesmas ao redor do duto. Para a metodologia foi considerado um domínio bidimensional assim como diferentes tipos de solo e de temperatura do ar ambiente. Eles observaram melhorias na taxa de transferência de calor entre os dutos e o solo com a incorporação das aletas. Os autores não chegaram a analisar os efeitos das aletas na variação da temperatura de saída dos TCSA, aspecto que foi desenvolvido nesta pesquisa e cujos resultados são apresentados no Capítulo 3.

Para finalizar a revisão, destaca-se que os resultados para os TCSAs variam nas diferentes partes do mundo, ou mesmo dentro de um único país, porém em muitas propostas de instalação é possível tratar alguns dos parâmetros e variáveis - resumidos na Fig. 2 - que afetam os TCSAs para tentar melhorar esses resultados. No presente trabalho, são analisadas como estratégias específicas para obter essa melhoria, o acoplamento dos dutos com material galvanizado com alta condutividade térmica e a variação da profundidade da instalação. Inicialmente, foram testadas configurações inspiradas em Hassanzadeh et al. (2018), adaptadas às condições da cidade de Viçosa. Uma vez analisados os ganhos térmico e a eficiência do sistema em cada configuração, o trabalho continuou com o estudo do desempenho das instalações variando a profundidade de assentamento do duto.

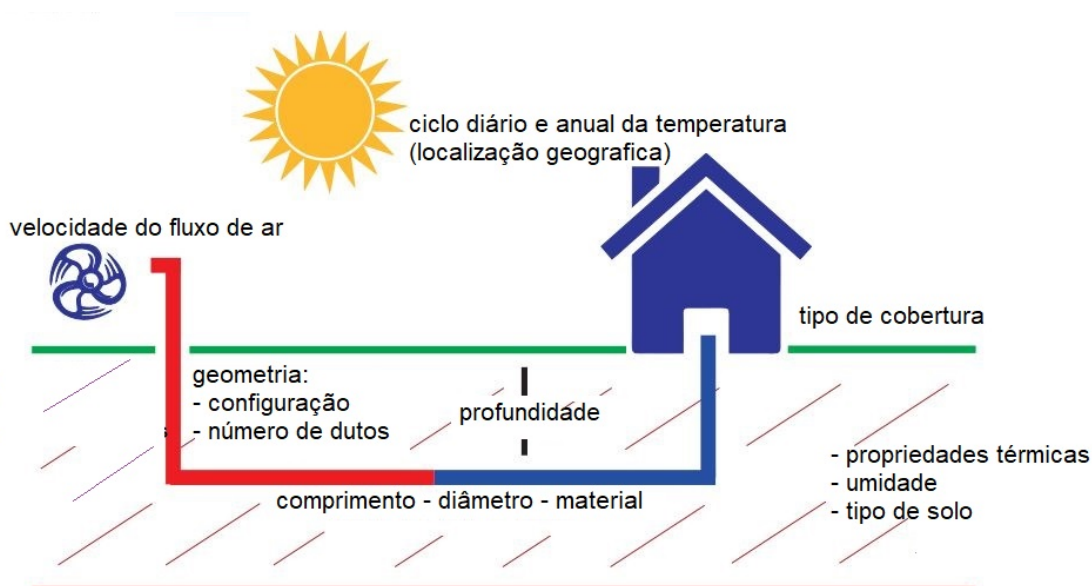


Figura 2: Variáveis e parâmetros de um TCSA.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa visa avaliar numericamente o desempenho térmico do TCSA após o acoplamento de aletas galvanizadas ao duto, com configurações adaptadas do trabalho de Hassanzadeh et al. (2018).

1.2.2 Objetivos específicos

- Validar e verificar o modelo numérico do TCSA adotado.
- Avaliar quais configurações de dutos aletados melhoram o desempenho térmico do TCSA, levando-se em consideração seu potencial térmico e a sua eficiência.

- Comparar o desempenho do TCSA com a melhor configuração encontrada, instalado a diferentes profundidades.
- Estudar como a variação da geometria da região galvanizada, ou das aletas em torno dos dutos, afeta o desempenho dos TCSAs.
- Analisar qual é a influência da difusividade térmica no desempenho térmico do TCSA.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 2 apresenta a metodologia científica utilizada para obtenção dos resultados apresentados. Detalha-se o modelo GAEA, fundamental na simulação do TCSA, assim como as conceituações que permitem estimar a temperatura do solo e as técnicas numéricas baseadas numa combinação do Método de Diferenças Finitas e do Método de Elementos Finitos.

No capítulo 3, são apresentados os resultados obtidos. As informações são fornecidas por meio de gráficos e tabelas com suas respectivas análises. Incluem-se no capítulo: a validação do modelo adotado no trabalho, o efeito alcançado no TCSA com a incorporação de materiais galvanizados e um estudo do desempenho dos TCSA ao variar a profundidade da instalação.

Finalmente, o capítulo 4 apresenta as principais conclusões do trabalho e perspectivas de pesquisas futuras.

2 METODOLOGIA

2.1 Dados gerais

O uso de métodos numéricos e computacionais para o estudo dos TCSAs tem a vantagem, perante os métodos experimentais, de não requerer instalações experimentais caras e longos períodos de construção e monitoramento. Por isso, essa é a metodologia escolhida aqui (AGRAWAL ET AL., 2019; BRUM ET AL., 2013A).

Para as simulações deste trabalho foi considerada a parte reta enterrada do duto, como feito em Brum (2016), utilizando os dados da instalação experimental de Vaz (2011), na cidade de Viamão. Baseados no trabalho de Hassanzadeh et al. (2018), diferentes configurações de aletas galvanizadas foram adotadas ao redor do duto, que por sua vez é envolto por um bloco feito do mesmo material.

Na direção longitudinal do duto, para cada profundidade fixada, as temperaturas do solo são consideradas constantes. Portanto, as temperaturas do solo podem ser estimadas por uma modelagem 2D, adotando-se domínios computacionais semelhantes ao mostrado na Fig. 3, onde: a profundidade do centro do duto é z_0 (inicialmente igual a 1.6 m), $b_0 = 0.18$ m é o tamanho do bloco (que possui seção transversal quadrada), $S_v = 1$ m e $S_h = 0.01$ m representam, respectivamente, os tamanhos vertical e horizontal das aletas, $D_0 = 0.11$ m é o diâmetro do duto. Na referida figura, apenas uma aleta foi considerada e o sentido positivo do eixo z foi tomado como é feito em Vaz (2011) no estudo da difusão do calor no solo.

A Fig. 4 apresenta o perfil tridimensional relativo a mesma configuração da Fig. 3, onde o duto, o bloco e a aleta tem o mesmo comprimento, $L_0 = 25.77$ m.

A partir das referências de Vaz (2011); Hassanzadeh et al. (2018), são obtidas as propriedades termofísicas do solo e do ar em Viamão e dos materiais galvanizados; seus valores são fornecidos na Tabela 1. Este trabalho não considera a espessura e propriedades dos dutos como é feito em Vaz et al. (2011); a espessura dos dutos é muito pequena, influenciando muito pouco as trocas térmicas (ASCIONE ET AL., 2011).

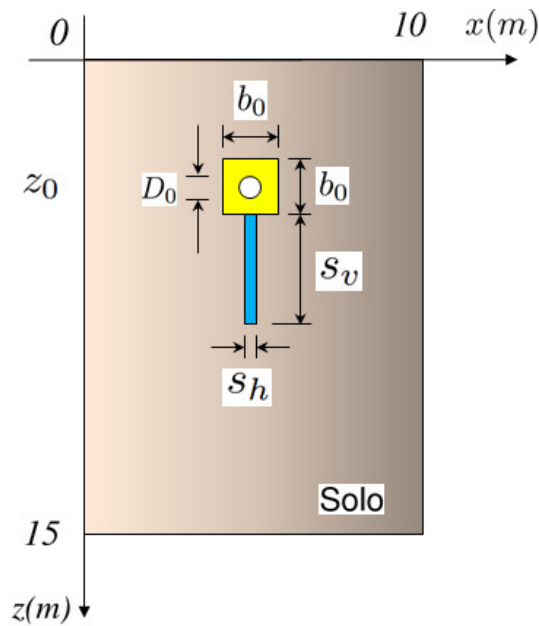


Figura 3: Domínio computacional 2D.

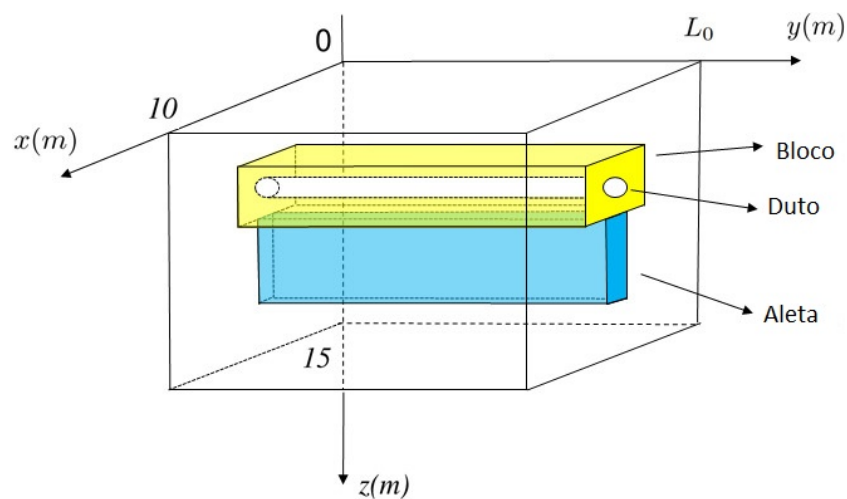


Figura 4: Domínio computacional 3D.

Tabela 1: Propriedades termofísicas do solo, do ar e dos materiais galvanizados.

	Massa específica ρ (kg/m ³)	Calor específico c_p (J/kgK)	Condutividade térmica λ (W/mK)	Viscosidade dinâmica μ (kg/ms)
Solo	1800	1780	2.1	-
Materiais galvanizados	7800	446	52	-
Ar	1.16	1010	0.0242	1.789×10^{-5}

Na sequência da metodologia, a próxima seção apresenta o modelo adotado para calcular as temperaturas na saída do duto dos TCSA.

2.2 Modelagem matemática dos TCSA

Para simular os TCSA, adota-se o modelo GAEA (*Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern*¹), que foi apresentado por Benkert et al. (1997) e usado em diferentes referências como Papakostas et al. (2019); Domingues et al. (2021). Destaca-se que em Domingues et al. (2021) o modelo foi validado para as condições do trabalho de Vaz (2011).

O GAEA é um modelo unidimensional, para determinar as temperaturas ao longo de um duto de TCSA. Ele utiliza estimativas analíticas para diferentes coeficientes de transferência de calor para as trocas térmicas entre o ar e as paredes dos dutos, bem como entre as paredes e o solo ao seu redor. Desta forma, sua implementação computacional é relativamente simples e o tempo das simulações é baixo, permitindo obter um rápido entendimento de muitas questões referentes à variação de alguns parâmetros de TCSA.

Para construir o modelo GAEA, considera-se que a temperatura nas paredes do duto depende principalmente da troca térmica com o solo, mas ele também considera a influência do escoamento do ar nos dutos. Para medir a razão entre os dois efeitos é introduzido, para fornecer a relação de condutância da transferência de calor, o parâmetro adimensional (BENKERT ET AL., 1997)

$$U^* = \frac{2\pi\lambda_s}{U_L \ln\left(\frac{2z_0}{D_0} + \sqrt{\left(\frac{2z_0}{D_0}\right)^2 - 1}\right)}, \quad (1)$$

onde λ_s é a condutividade térmica do solo (em W/mK), z_0 é a profundidade do centro do duto, D_0 é o diâmetro do duto (ambos em m) e

$$U_L = \pi D_0 h \quad (2)$$

representa o coeficiente geral de transferência de calor (por comprimento do duto) entre a corrente de ar e as paredes do duto (Benkert et al., 1997).

O coeficiente de convecção na superfície interna do duto é avaliado com a seguinte equação (BEJAN, 2013)

$$h = \frac{\lambda_a N_u}{D_0}. \quad (3)$$

Aqui λ_a é a condutividade térmica do ar (em W/mK), enquanto o número de Nusselt² é dado por

$$N_u = 0.0214 (R_e^{0.8} - 100) P_r^{0.4}. \quad (4)$$

Conforme Bejan (2013); Benkert et al. (1997), os números adimensionais de Rey-

¹Projeto gráfico de TCSA em tradução livre do Alemão

²Seu valor neste trabalho é 57.9460

nolds³ e Prandtl⁴ são definidos, respectivamente, por

$$Re = \frac{\rho_a v_a D_0}{\mu_a}, \quad (5)$$

$$Pr = \frac{\mu_a c_{p,a}}{\lambda_a}. \quad (6)$$

Nas equações (5) e (6), ρ_a , μ_a , $c_{p,a}$ e v_a são, respectivamente, a massa específica (em kg/m³), viscosidade dinâmica (em kg/(ms)), o calor específico (em J/(kgK)) do ar e a velocidade de escoamento do ar (em m/s).

A temperatura do solo, T_s , é estimada em uma condição não perturbada, isto é, supondo que não há dutos no local. Nesse ponto, adota-se que essa temperatura é conhecida e na próxima seção se apresentam os cálculos para determinar T_s .

Como foi desconsiderada a presença dos dutos, então é preciso fazer uma correção na temperatura nas paredes do duto, a qual é estimada pela Eq. (7):

$$T_{c,w} = \frac{U^* T_s + T_a}{U^* + 1}, \quad (7)$$

onde $T_{c,w}$, em unidades de temperatura, é uma média ponderada entre a temperatura do ar dentro do duto, T_a , e a temperatura do solo na parede do duto (não influenciada por sua presença), T_s . Logo, U^* funciona como um fator de ponderação.

Além disso, ao invés de calcular $T_{c,w}$ diretamente pela Eq. (7), Benkert et al. (1997) propuseram a divisão do comprimento do duto em 100 segmentos, onde as trocas térmicas são determinadas iterativamente. Basicamente, assume-se que cada segmento é suficientemente pequeno para que o ar escoe nele com uma temperatura aproximadamente constante e que ocorrem saltos nos valores das temperaturas entre segmentos distintos.

Para cada segmento, k , é calculada uma correção da temperatura do solo na parede do duto através da fórmula

$$T_{c,w}^k = \frac{U^* T_s + T_{a,ent}^k}{U^* + 1}, \quad (8)$$

onde $T_{a,ent}^k$ é a temperatura do ar na entrada do k -ésimo segmento. Ainda no mesmo segmento, a taxa de transferência de calor é dada por:

$$\dot{Q}_k = \Delta x U_L (T_{c,w}^k - T_{a,ent}^k), \quad (9)$$

onde $\Delta x = L_0/100$ é o tamanho de cada segmento e L_0 o comprimento do duto. Além

³Seu valor neste trabalho é 2.3537×10^4

⁴Seu valor neste trabalho é 0.7466

disso, essa taxa também é dada por:

$$\dot{Q}_k = \dot{m} c_{p,a} (T_{a,sai}^k - T_{a,ent}^k), \quad (10)$$

onde $T_{a,sai}^k$ é a temperatura do ar na saída do k -ésimo segmento e \dot{m} a vazão do ar. O duto é considerado circular, então (DOMINGUES ET AL., 2021)

$$\dot{m} = \rho_a v_a \frac{\pi D_0^2}{4}. \quad (11)$$

Usando as equações (9) e (10), isola-se $T_{a,sai}^k$ obtendo:

$$T_{a,sai}^k = T_{a,ent}^k + \frac{\Delta x U_L (T_{c,w}^k - T_{a,ent}^k)}{\dot{m} c_{p,a}}. \quad (12)$$

Resumindo, a temperatura do ar na saída de cada segmento é calculada em função da temperatura do ar na entrada do mesmo, usando a Eq.(12). Deve-se notar que a saída do segmento k é a entrada do segmento $k + 1$. Quando começa-se o processo iterativo, sabe-se a temperatura na entrada do primeiro segmento ($k = 1$), pois ela coincide com a temperatura na entrada do duto. O algoritmo termina encontrando a temperatura na saída do último segmento ($k = 100$), que coincide com a saída do duto. Para fazer as simulações com o modelo GAEA, foi implementado um código na linguagem de programação MATLAB (2010). A Fig. 5 mostra uma simplificação da modelagem do TCSA onde o interesse está na dimensão do comprimento do duto.

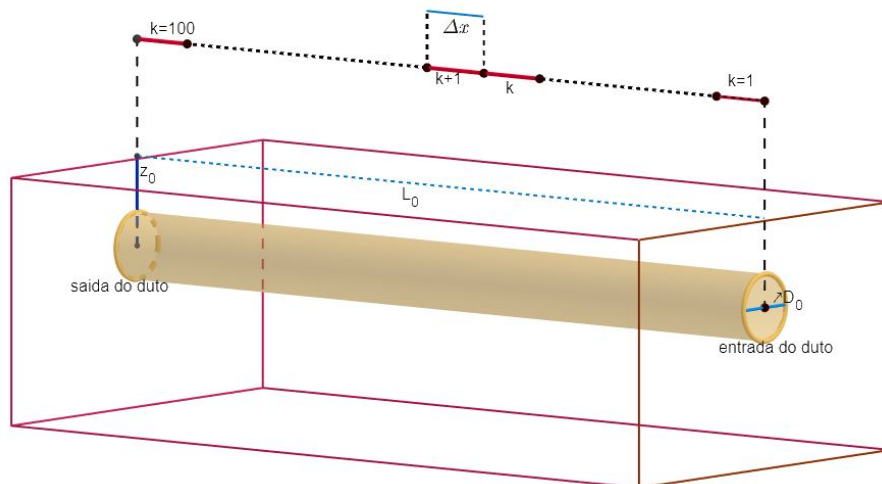


Figura 5: Modelagem do TCSA.

Visto que o modelo GAEA depende da temperatura do solo na região do duto, é necessário explicar a metodologia adotada para fazer esses cálculos. Isso é feito nas próximas seções, começando por revisar a modelagem física e as equações de conservação de energia adotadas para modelar o problema de condução de calor no

solo.

2.3 Modelagem matemática da temperatura no solo

As equações fundamentais da mecânica do contínuo estão baseadas nos princípios de conservação de certas quantidades físicas. Nesta seção, considera-se em especial o princípio da conservação da energia para estabelecer a equação básica que rege o problema de valor inicial e de contorno deste trabalho, também conhecido como problema da condução do calor.

Sabe-se que o fluxo de calor é uma forma de transferência de energia em um meio contínuo que pode ocorrer de três maneiras: por condução, por convecção e por radiação. O interesse aqui está na condução térmica, que pode ser conceituada como a transferência de energia na forma de calor causada pela vibração e colisão de moléculas e átomos sem transporte de massa. Assim, quando um meio contínuo sofre uma variação de temperatura não uniforme, o calor é transferido de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa. Quando tal transferência ocorre sem transporte de massa, o fenômeno é conhecido como um problema de condução de calor. A lei fenomenológica (equação constitutiva do fluxo de calor) que rege o comportamento da condução de calor pode ser definida por meio da lei de Fourier da condução de calor (BERGMAN ET AL., 2011), que afirma que o fluxo de calor, ϕ , é proporcional ao gradiente de temperatura, isto é:

$$\phi = -\lambda \nabla T, \quad (13)$$

onde λ é a condutividade térmica do meio material e T sua temperatura. Lembra-se que o gradiente da temperatura em coordenadas cartesianas é dado por:

$$\nabla T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (14)$$

onde adota-se a nomenclatura usual x, y, z para descrição dos eixos coordenados. O sinal negativo é introduzido na Eq. (13) porque o sentido de crescimento da temperatura (mesmo sentido do gradiente) é contrário ao sentido do fluxo de calor, o qual se desloca das regiões onde a temperatura é maior para aquelas em que ela é menor.

Por simplicidade, considera-se um sólido de volume finito, $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$,

como na Fig. 6, onde a componente x do fluxo é dada por $\phi_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$.

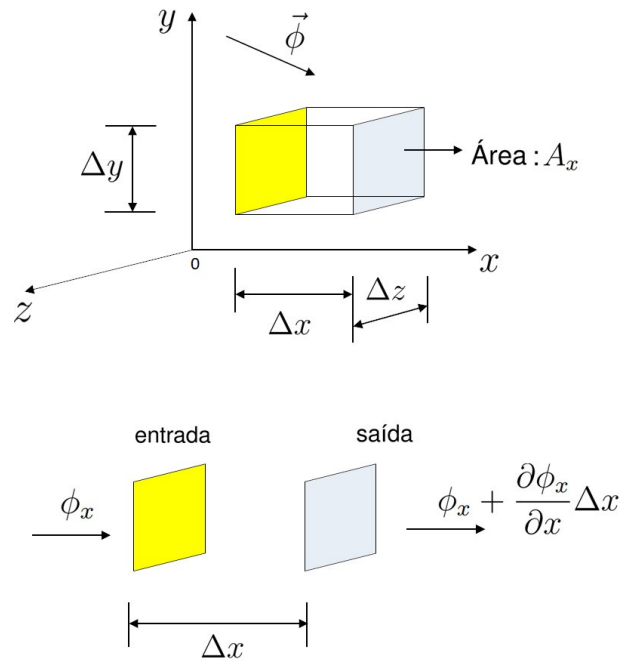


Figura 6: Volume finito sob ação de um fluxo de calor ϕ . Notação e definições.

Supondo Δx suficientemente pequeno, a diferença entre as taxas das quantidades de calor que entram e saem do volume, na direção x , são dadas por:

$$\dot{Q}_{x,ent} - \dot{Q}_{x,sai} = \phi_x A_x - \left(\phi_x + \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \Delta x \right) A_x \quad (15)$$

$$= - \frac{\partial \phi_x}{\partial x} \Delta x A_x \quad (16)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \Delta V. \quad (17)$$

Generalizando o resultado anterior para todas as direções, a diferença entre as taxas das quantidades de calor que entram e saem de um volume suficientemente pequeno é dada por:

$$\dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{sai} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \Delta V. \quad (18)$$

Este resultado pode ser escrito mais simplesmente por:

$$\dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{sai} = [\text{div}(\lambda \nabla T)] \Delta V. \quad (19)$$

Note-se que o operador divergente de um vetor $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$, em coordenadas cartesianas é dado por:

$$\text{div}(\mathbf{v}) = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}. \quad (20)$$

Utilizando o princípio da conservação de calor em um sólido de volume finito, pode-

se dizer que a taxa de variação temporal da energia acumulada no sólido é igual à subtração das taxas das quantidades de calor que entram e que saem do mesmo. Como a primeira taxa é dada por $\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} \Delta V$ (BEJAN, 2013), então a equação diferencial

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \text{div}(\lambda \nabla T) \quad (21)$$

serve para modelar a distribuição de temperatura em sólidos, onde ρ e c_p são, respectivamente, a massa específica e calor específico do seu material.

Supondo que ρ , c_p e λ são constantes no volume, então, escreve-se o último resultado de maneira mais compacta, através da equação

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (22)$$

onde

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (23)$$

é a difusividade térmica do material que compõe o sólido e

$$\nabla^2 T = \text{div}(\nabla T) \quad (24)$$

é o operador laplaciano.

Neste trabalho, a temperatura do solo, T_s , como dado de entrada do modelo GAEA, é calculada numericamente resolvendo o problema de valor inicial e de contorno (PVIC) dado pela equação diferencial parcial (EDP) em (22), complementada com condições de contorno representadas esquematicamente na Fig. 7 e condição inicial discutida mais adiante e estabelecida através da Eq. (30). Levando em conta a Fig. 7, é importante ressaltar que tal PVIC, descrito detalhadamente na subseção 2.4.3, considera como domínio espacial uma seção transversal ao duto, ou seja, um domínio espacial retangular paralelo ao plano coordenado $x - z$, no qual a temperatura do solo, T_s , de interesse é exatamente aquela determinada para a cota z no ponto de interseção com a linha de eixo do duto. Também importa lembrar que para toda cota z fixada interceptando a linha de eixo do duto, a temperatura do solo T_s é suposta constante ao longo dessa linha.

Diante das considerações introduzidas no parágrafo anterior, indicando por $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ o domínio espacial do PVIC no plano coordenado $x - z$, e por $\mathcal{I}_{\tau_0} \subset \mathbb{R}$ seu domínio temporal, a EDP correspondente na variável dependente $T_s = T(x, z, t)$ toma a seguinte forma simplificada:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (x, z) \in \Omega, \quad t \in \mathcal{I}_{\tau_0}. \quad (25)$$

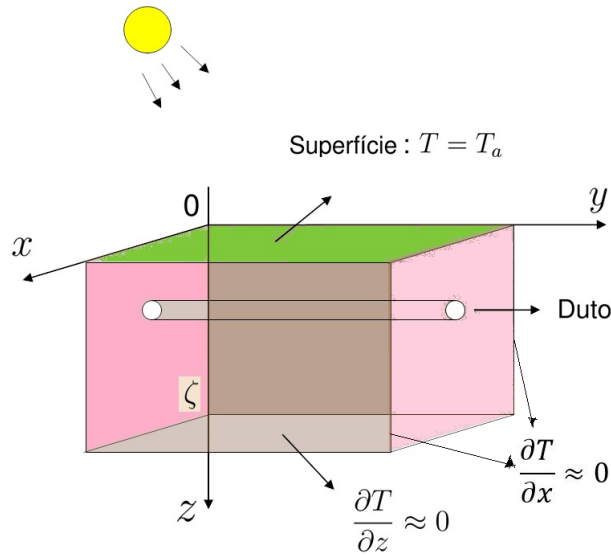


Figura 7: TCSA sob efeito único das condições climáticas.

Em geral, observa-se que a variação da temperatura do solo diminui com a profundidade, z . Assim como em Hermes et al. (2020), é considerado nas simulações numéricas uma porção de solo, integrando o TCSA, representada pela região \mathcal{R} do espaço euclidiano tridimensional definida por $\mathcal{R} := [0, l_x] \times [0, l_z] \times [0, l_y]$ onde as dimensões $l_x = 10$ m, $l_z = 15$ m e $l_y = 25.77$ m são tomadas ao longo das direções positivas dos eixos coordenados x , z e y respectivamente, de acordo com a Fig. 7.

Adicionalmente, assume-se que a profundidade l_z é suficientemente grande para se impor uma condição de contorno adiabática, isto é:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{l_z} = 0. \quad (26)$$

Do mesmo modo, adota-se condições adiabáticas nos bordos laterais da região $\mathcal{R} \subset \mathbb{R}^3$. Ou seja, definindo os subconjuntos de \mathcal{R} dados por $\Pi_0 := \{(x, z, y) \in \mathcal{R} \mid x = 0\}$ e $\Pi_1 := \{(x, z, y) \in \mathcal{R} \mid x = l_x\}$, segue-se que

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\Pi_0} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\Pi_1} = 0. \quad (27)$$

Lembrando que para uma determinada profundidade $z^* \in]0, l_z[$ fixada, os pontos sobre a linha de eixo do duto possuem coordenadas $(x, z, y) = (l_x/2, z^*, y)$, $y \in [0, l_y]$, as condições de contorno na Eq. (27) indicam que a derivada direcional da temperatura na direção do eixo coordenado x , restrita a pontos dos planos Π_0 e Π_1 , é nula. Fisicamente significa dizer que não existe fluxo de calor através dos planos Π_0 e Π_1 , ou seja, que a temperatura do solo nos pontos de Π_0 e Π_1 é constante. Essas condições

baseiam-se na suposição de que a linha de eixo do duto encontra-se suficientemente distante dos planos Π_0 e Π_1 .

Como pode ser visto na Fig. 7, considera-se que a região \mathcal{R} está sob efeito único das condições climáticas. Assim, seguindo uma abordagem usual, que pode ser encontrada por exemplo em Hermes et al. (2020), considera-se que a temperatura na superfície do solo (em $z = 0$) é igual à temperatura do ar, T_a , levando à última condição de contorno:

$$T|_{z=0} = T_a. \quad (28)$$

Os dados anuais da temperatura do ar na cidade de Viamão são aproximados como feito em Domingues et al. (2021). Usando um ajuste por mínimos quadrados dos dados de Vaz (2011), T_a é modelada pela função periódica:

$$T_a(t) = 20.49 + 5.66 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{365} t - 5.30 \right), \quad (29)$$

onde os valores da temperatura estão em $^{\circ}\text{C}$ e o tempo t está em dias.

Uma questão relevante neste tipo de problema é que a condição inicial normalmente não pode ser determinada. Em referências como Brum (2016) assume-se uma condição inicial constante, igual à temperatura média do solo. Em Brum et al. (2019), observa-se que a partir do segundo ano de simulações, esta condição não afeta mais as soluções, por isso, o trabalho propõe a execução de dois anos de simulação, descartando-se os resultados do primeiro ano.

É interessante frisar que diferentemente do procedimento adotado neste trabalho, visando reduzir o custo computacional das simulações envolvendo TCSA, pesquisas recentes têm explorado indicadores estatísticos, veja por exemplo Vitoria et al. (2020). Tal abordagem aponta um caminho para futuros desenvolvimentos deste trabalho.

Mais recentemente, Domingues et al. (2021) adotou uma condição inicial baseada em um modelo analítico unidimensional (considerando variações de temperatura apenas na direção z), semelhante ao disposto em Vaz (2011); Ozgener et al. (2013). Utilizando essa segunda proposta, baseando-se nas condições apresentadas em Viamão e ajustadas por mínimos quadrados, a condição inicial utilizada nesse trabalho foi

$$T = T_0(z) = 20.49 - 5.66 \operatorname{sen}(5.30 + 0.39z)e^{-0.39z} \text{ em } t = 0 \text{ s.} \quad (30)$$

Como foi visto nas simulações, a vantagem dessa aproximação é que o efeito da condição inicial ficou restrito aos dois primeiros meses. Desse modo, neste trabalho realiza-se simulações cobrindo um tempo total de um ano e dois meses, descartando apenas os dois primeiros meses. Portanto, essa abordagem reduziu o custo compu-

tacional para avaliar um ano de operação de uma instalação de TCSA.

Apresentada a modelagem física do problema, junto com o modelo matemático utilizado, precisa-se agora explicar os procedimentos para a sua resolução numérica. O problema de valor inicial e de contorno, composto pela Eq. (25) e pelas condições dadas nas Eqs. (26) a (30), é resolvido numericamente por uma metodologia mista. A discretização temporal utiliza um método de diferenças finitas (ÖZISIK, 1993; GERALD AND WHEATLEY, 1990), enquanto a discretização espacial usa um método de elementos finitos (HUGHES, 1987; BECKER ET AL., 1981; LOGG ET AL., 2012). A descrição dessa metodologia numérica será abordada na seção 2.4.

2.4 Resolução numérica

Nesta seção, apresenta-se os aspectos centrais do método de elementos finitos (MEF) aplicado especificamente à resolução numérica do problema modelo aqui analisado. Neste trabalho foi adotado o MEF pelas diversas vantagens que possui sobre, por exemplo, o método de diferenças finitas, entre as quais destaca-se a possibilidade de lidar com domínios computacionais de geometria complexa e a possibilidade de considerar materiais heterogêneos (CHAPRA AND CANALE, 2007).

2.4.1 Descrição geral do MEF

Uma abordagem direta para resolver equações diferenciais parciais dependentes do tempo pelo MEF consiste, em primeiro lugar, discretizar a derivada temporal por meio de uma aproximação por diferenças finitas que produz um conjunto recursivo de problemas estacionários. Seguidamente, transformar cada problema estacionário em uma formulação variacional, conhecida como formulação semi-discretizada no tempo.

Para obter uma formulação completamente discretizada considera-se uma triangulação do domínio espacial em elementos triangulares fechados (malha).

O MEF, usado na discretização da parte espacial, requer que o problema seja expresso como um problema variacional contínuo. Para fazer isso, em geral são considerados dois espaços de funções. Um deles, no qual reside a solução procurada, é conhecido como espaço das funções tentativas, enquanto que o outro é chamado de espaço das funções testes.

Finalmente, para resolver o problema numericamente, precisa-se transformar o problema variacional contínuo em um problema variacional discreto. Isto é feito introduzindo espaços de funções tentativas e testes de dimensão finita.

Uma síntese com as principais etapas do processo de resolução numérica via MEF do PVIC tratado neste trabalho é apresentada na Fig. 8.

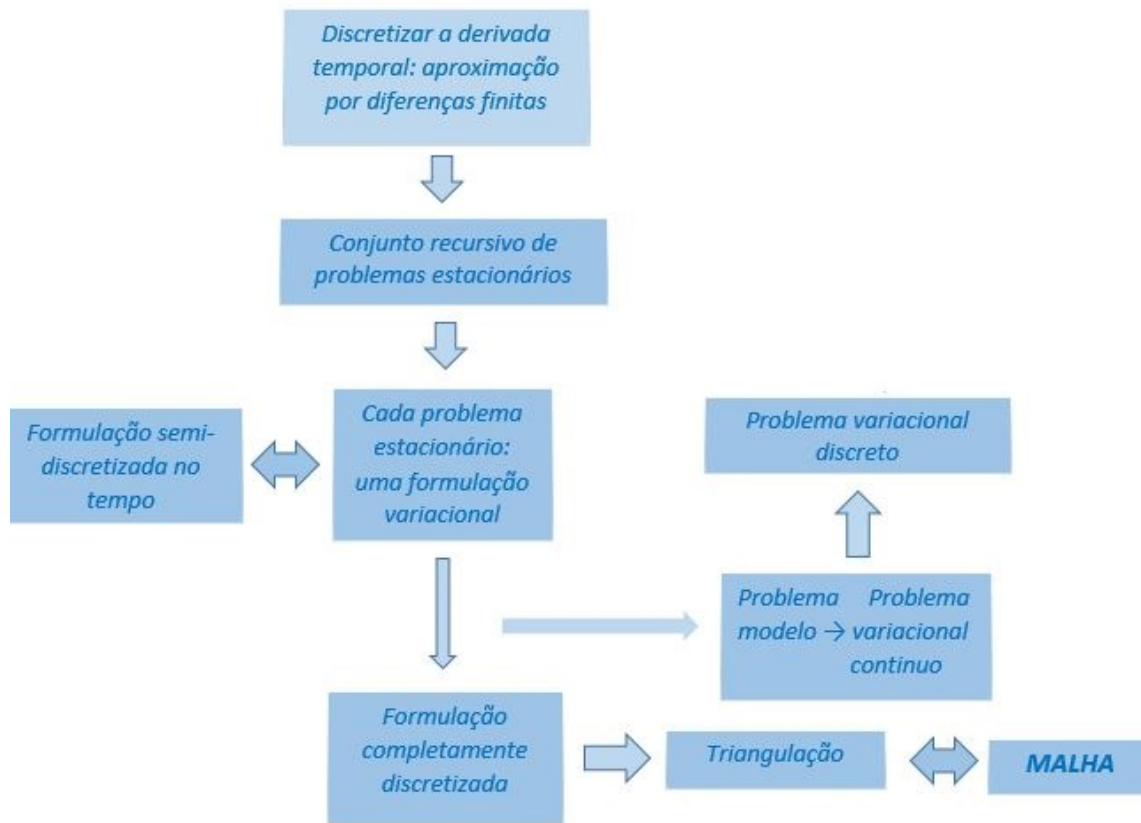


Figura 8: Heurística do MEF para problemas transientes.

2.4.2 Definições e notações

Visando as descrições das formulações forte, fraca, semi-discretizada e completamente discretizada do problema modelo aqui descrito, dependente do tempo, denota-se por $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ seu domínio espacial e por $I_{\tau_0} :=]0, \tau_0] \subset \mathbb{R}$ seu domínio temporal, o que permite definir $Q := \Omega \times I_{\tau_0}$ como sendo o domínio espaço-tempo do problema modelo.

Especificamente neste trabalho, o domínio espacial Ω é dado por $\Omega :=]0, l_x[\times]0, l_z[$ com l_x e l_z números reais positivos representando, respectivamente, comprimentos unidimensionais nas direções x e z . O fecho de Ω , denotado por $\bar{\Omega}$, é definido como

$$\bar{\Omega} := \Omega \cup \partial\Omega, \quad (31)$$

onde $\partial\Omega$ denota a fronteira de Ω subdividida em quatro partes Γ_i , $i \in \{1, 2, 3, 4\}$ dadas por

$$\begin{aligned}
\Gamma_1 &:= \{(x, z) \in \mathbb{R}^2 ; 0 < x < l_x \text{ e } z = 0\} , \\
\Gamma_2 &:= \{(x, z) \in \mathbb{R}^2 ; 0 < z < l_z \text{ e } x = l_x\} , \\
\Gamma_3 &:= \{(x, z) \in \mathbb{R}^2 ; 0 < x < l_x \text{ e } z = l_z\} , \\
\Gamma_4 &:= \{(x, z) \in \mathbb{R}^2 ; 0 < z < l_z \text{ e } x = 0\} ,
\end{aligned}$$

que permitem definir a fronteira $\partial\Omega$ do domínio espacial Ω como

$$\partial\Omega := \overline{\bigcup_{i=1}^4 \Gamma_i} . \quad (32)$$

Por conveniência, são introduzidas as designações Γ_D e Γ_N para indicar fronteiras com condições de contorno do tipo Dirichlet e Neumann respetivamente, dadas por

$$\Gamma_D := \Gamma_1 , \quad (33)$$

$$\Gamma_N := \bigcup_{i=2}^4 \Gamma_i . \quad (34)$$

Para todo campo escalar g dado por

$$\begin{aligned}
g &: \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R} \\
(x, z) &\mapsto s = g(x, z) ,
\end{aligned} \quad (35)$$

que assume-se ser suficientemente regular, os operadores gradiente e laplaciano aplicados à função g são indicados com os símbolos ∇g e $\nabla^2 g$ respetivamente, sendo definidos por

$$\nabla g := \left(\frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial z} \right) , \quad (36)$$

$$\nabla^2 g := \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 g}{\partial z^2} . \quad (37)$$

Analogamente, para todo campo vetorial \mathbf{w} dado por

$$\begin{aligned}
\mathbf{w} &: \Omega \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2 \\
(x, z) &\mapsto \mathbf{q} = \mathbf{w}(x, z) = (w_1(x, z), w_2(x, z)) ,
\end{aligned} \quad (38)$$

e suficientemente regular, o operador divergente aplicado à \mathbf{w} , denotado por $\text{div}(\mathbf{w})$, é definido por

$$\operatorname{div}(\mathbf{w}) := \frac{\partial w_1}{\partial x} + \frac{\partial w_2}{\partial z}. \quad (39)$$

Indica-se por $\hat{\mathbf{n}}$ o vetor normal unitário exterior ao domínio espacial Ω definido em cada ponto de $\partial\Omega$. Com isso,

$$\frac{\partial g}{\partial \hat{\mathbf{n}}} := \nabla g \cdot \hat{\mathbf{n}}, \quad (40)$$

denota a derivada normal de g em algum ponto arbitrário de $\partial\Omega$.

Para todo subconjunto fechado $\omega \subset \mathbb{R}^d$, $d \in \{1, 2, 3\}$, denota-se por $\mathring{\omega}$ o seu interior.

Por simplicidade de notação, para quaisquer duas funções escalares f e g definidas em ω cujo produto $f g$ é integrável sobre ω , indica-se tal integral por

$$\int_{\omega} f g \, d\omega := (f, g)_{\omega}. \quad (41)$$

Para obter a formulação semi-discretizada no tempo, o intervalo de tempo \bar{I}_{τ_0} é dividido em $N+1$ pontos nodais temporais da forma $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{N-1} < t_N = \tau_0$, com $N \in \mathbb{N}$, onde \bar{I}_{τ_0} denota o fecho de I_{τ_0} .

Para cada $n \in \mathcal{I}_N := \{1, \dots, N\}$, define-se o intervalo de tempo $I_n := [t_{n-1}, t_n]$ que permite estabelecer a partição $\mathcal{T}_{\Delta t} = \{I_n\}_{n=1}^N$ do domínio temporal \bar{I}_{τ_0} em subintervalos I_n de tamanho uniforme dado por $\Delta t = \tau_0/N$.

Para obter uma formulação completamente discretizada do domínio espacial $\bar{\Omega}$ em elementos triangulares fechados K_j , define-se a triangulação $\mathcal{T}_h := \{K_j\}_{j \in \mathcal{I}_J}$, chamada de malha onde $\mathcal{I}_J := \{1, \dots, J\}$ é um conjunto de índices. Esses elementos triangulares satisfazem as seguintes condições:

$$(i) \quad \bar{\Omega} = \bigcup_{j \in \mathcal{I}_J} K_j;$$

$$(ii) \quad \mathring{K}_j \neq \emptyset \quad \forall j \in \mathcal{I}_J;$$

$$(iii) \quad \mathring{K}_i \cap \mathring{K}_j = \emptyset \quad \forall K_i, K_j \in \mathcal{T}_h, K_i \neq K_j;$$

(iv) Se $E = K_i \cap K_j$, $K_i, K_j \in \mathcal{T}_h$, $K_i \neq K_j$, então E é uma aresta comum, ou um vértice comum de K_i e K_j , ou $E = \emptyset$;

(v) $\operatorname{diam}(K) =: h_K \leq h \quad \forall K \in \mathcal{T}_h$; $\operatorname{diam}(K)$ denota o diâmetro de um elemento arbitrário K pertencente a malha \mathcal{T}_h (o parâmetro h é chamado de dimensão característica da malha e corresponde ao diâmetro máximo).

Os dois espaços de funções que levam a expressar o problema como um problema variacional contínuo coincidem neste trabalho sendo definidos por

$$V := \{v \in H^1(\Omega) : v = 0 \text{ sobre } \Gamma_D\}. \quad (42)$$

De forma breve, $H^1(\Omega)$ é um espaço de Sobolev contendo funções v tais que v^2 e $|\nabla v|^2$ possuem integrais finitas sobre Ω . Aqui indica-se por $|\cdot|$ a usual norma euclidiana. Para detalhes sobre espaços de Sobolev, ver Quarteroni and Valli (1997), por exemplo.

Os espaços de funções tentativas e testes de dimensão finita que permitem transformar o problema variacional contínuo em um problema variacional discreto também coincidem, sendo denotados aqui por $V_h \subset V$ e definidos como

$$V_h := \{v_h \in C^0(\bar{\Omega}) : v|_K \in \mathbb{P}_k(K), \forall K \in \mathcal{T}_h\}, \quad (43)$$

onde $C^0(\bar{\Omega})$ é o espaço das funções contínuas em $\bar{\Omega}$, $\mathbb{P}_k(K)$ é o espaço dos polinômios de grau igual ou inferior a $k > 0$ em cada elemento K da triangulação \mathcal{T}_h . Indica-se por N_h a dimensão do espaço V_h , ou seja, $\dim V_h = N_h$. Em particular, quando $k = 1$ em (43), tem-se que N_h é igual ao número de vértices da partição \mathcal{T}_h .

2.4.3 Descrição do problema

Inicia-se esta subseção exibindo, na Fig. 9, uma representação esquemática do domínio espacial Ω de definição do problema envolvendo o aquecimento e resfriamento do solo decorrentes de uma temperatura superficial oscilante. Na referida figura destaca-se a possibilidade de Ω apresentar regiões de condutividades térmicas distintas introduzindo os valores $\lambda_i, i \in \{1, 2\}$. Também são especificadas as condições de contorno para o problema, do tipo Dirichlet dada por $T = T_a(t)$ sobre $\Gamma_1 := \Gamma_D$, e do tipo Neumann homogênea, dada por $\nabla T \cdot \hat{\mathbf{n}} = 0$ sobre $\bigcup_{i=2}^4 \Gamma_i := \Gamma_N$.

Portanto, o problema modelo, para obtenção das temperaturas do solo ao longo do ano, consiste no problema de valor inicial e de contorno (PVIC) que pode ser declarado da seguinte maneira:

Dadas as funções $T_a : (0, \tau_0] \rightarrow \mathbb{R}$ e $T_0 : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, encontrar o campo escalar $T : \bar{\Omega} \times [0, \tau_0] \rightarrow \mathbb{R}$ satisfazendo

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{\rho c_p} \operatorname{div}(\lambda \nabla T) & \text{em } Q := \Omega \times]0, \tau_0], \\ T = T_a & \text{sobre } \Sigma_D := \Gamma_D \times]0, \tau_0], \\ \frac{\partial T}{\partial \hat{\mathbf{n}}} = 0 & \text{sobre } \Sigma_N := \Gamma_N \times]0, \tau_0], \\ T = T_0 & \text{em } \Omega_0 := \Omega \times \{0\}. \end{cases} \quad (44)$$

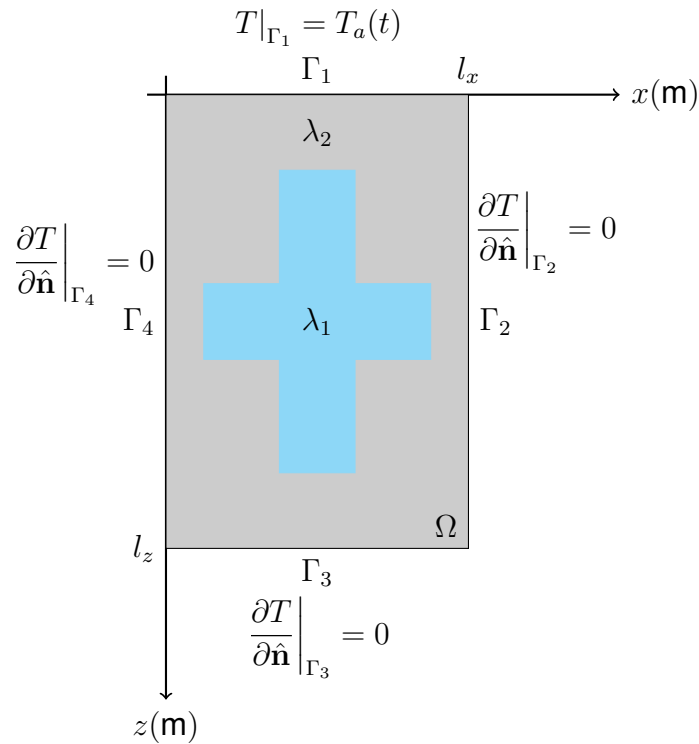


Figura 9: Ilustração do domínio espacial $\Omega :=]0, l_x[\times]0, l_z[$ de fronteira $\partial\Omega$.

Por conveniência, ao invés de resolver o PVIC em (44), considera-se uma mudança de variável da forma

$$T = u + T_a, \quad (45)$$

que permite reescrever o problema modelo original em (44) como

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\rho c_p} \operatorname{div}(\lambda \nabla u) = -\frac{\partial T_a}{\partial t} \quad \text{em } Q := \Omega \times]0, \tau_0], \\ u = 0 \quad \text{sobre } \Sigma_D := \Gamma_D \times]0, \tau_0], \\ \frac{\partial u}{\partial \hat{\mathbf{n}}} = 0 \quad \text{sobre } \Sigma_N := \Gamma_N \times]0, \tau_0], \\ u = T_0 - T_a(0) \quad \text{em } \Omega_0 := \Omega \times \{0\}. \end{array} \right. \quad (46)$$

A vantagem dessa modificação é que nenhuma das condições de contorno do novo PVIC acima varia no tempo.

2.4.4 Implementação do MEF

A implementação do MEF pode-se dividir nas seguintes etapas:

- Formulação semi-discretizada no tempo
- Formulação variacional contínua
- Formulação completamente discretizada

que são detalhadas nas subseções 2.4.4.1, 2.4.4.2 e 2.4.4.3.

2.4.4.1 Formulação semi-discretizada no tempo

Como pode-se ver, a solução u do problema modelo modificado em (46), varia no espaço e no tempo, isto é, $u = u(x, z, t)$ com $(x, z) \in \bar{\Omega}$ e $t \in \bar{I}_{\tau_0}$ representando o domínio espacial bidimensional e o domínio temporal respectivamente.

A abordagem adotada aqui, consiste em fazer primeiro uma discretização temporal, mantendo a parte espacial contínua. Isto é chamado de formulação semi-discretizada no tempo.

Para obter tal formulação, considera-se a partição $\mathcal{T}_{\Delta t}$ introduzida previamente na subseção 2.4.2, que permite associar a cada índice $n \in \mathcal{I}_t := \{0, 1, \dots, N\}$ um instante de tempo discreto $t_n := n\Delta t$ de modo que u^n denota o valor da função u no instante de tempo t_n , ou seja, $u^n := u(x, z, t_n) = u(x, z, n\Delta t)$. Os índices n em \mathcal{I}_t são chamados de níveis de tempo. Com isso, uma discretização por diferenças finitas no tempo consiste inicialmente em avaliar nosso problema modelo em algum nível de tempo $n \in \mathcal{I}_N$ fixado, porém arbitrário, o que conduz a

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{\partial u^n}{\partial t} - \operatorname{div}(\lambda \nabla u^n) = F^n & \text{em } \Omega \times \{t_n\}, \\ u^n = 0 & \text{sobre } \Sigma_D^n := \Gamma_D \times \{t_n\}, \\ \frac{\partial u^n}{\partial \hat{\mathbf{n}}} = 0 & \text{sobre } \Sigma_N^n := \Gamma_N \times \{t_n\}, \end{cases} \quad (47)$$

onde

$$F^n = - \left. \frac{\partial T_a}{\partial t} \right|_{t_n = n\Delta t} \quad (48)$$

e

$$u^0 = T_0 - T_a(0) \quad \text{em } \Omega = \Omega \times \{0\}. \quad (49)$$

Em seguida, a derivada temporal em (47)₁, pode ser aproximada por algum esquema de diferenças finitas. Aqui, por razões de simplicidade e estabilidade, escolhe-se o esquema de diferença regressiva:

$$\frac{\partial u^n}{\partial t} \approx \frac{u^n - u^{n-1}}{\Delta t}, \quad \text{para cada } n \in \mathcal{I}_N := \{1, \dots, N\}. \quad (50)$$

Usando (50) em (47)₁, obtem-se a formulação semi-discretizada no tempo válida

para cada $n \in \mathcal{I}_N$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{u^n - u^{n-1}}{\Delta t} - \frac{1}{\rho c_p} \operatorname{div}(\lambda \nabla u^n) = F^n \quad \text{em } \Omega \times \{t_n\}, \\ u^n = 0 \quad \text{sobre } \Sigma_D^n := \Gamma_D \times \{t_n\}, \\ \frac{\partial u^n}{\partial \hat{\mathbf{n}}} = 0 \quad \text{sobre } \Sigma_N^n := \Gamma_N \times \{t_n\}, \end{array} \right. \quad (51)$$

rescrita por conveniência sob a forma

$$\left\{ \begin{array}{l} u^n - \frac{\Delta t}{\rho c_p} \operatorname{div}(\lambda \nabla u^n) = u^{n-1} + \Delta t F^n \quad \text{em } \Omega \times \{t_n\}, \\ u^n = 0 \quad \text{sobre } \Sigma_D^n := \Gamma_D \times \{t_n\}, \\ \frac{\partial u^n}{\partial \hat{\mathbf{n}}} = 0 \quad \text{sobre } \Sigma_N^n := \Gamma_N \times \{t_n\}, \end{array} \right. \quad (52)$$

que a princípio, dados (48) e (49), pode ser resolvida recursivamente para cada $n \in \mathcal{I}_N$. A subseção seguinte aborda o ponto de partida para obtenção de uma solução aproximada desse problema através do MEF (Hughes, 1987).

2.4.4.2 Formulação variacional contínua

A aplicação do método de elementos finitos na resolução da formulação semi-discretizada no tempo em (52) começa com a obtenção da forma fraca associada. Para fazer isso, multiplica-se a equação (52)₁ por uma função teste $v \in V$ e integra-se a expressão resultante sobre Ω , o que fornece

$$\int_{\Omega} \left[u^n v - \frac{\Delta t}{\rho c_p} \operatorname{div}(\lambda \nabla u^n) v \right] d\Omega = \int_{\Omega} [u^{n-1} v + \Delta t F^n v] d\Omega. \quad (53)$$

A fórmula de integração por partes, também conhecida como identidade de Green (Gonzalez and Stuart, 2008; Thomas, 2015), dada por

$$- \int_{\Omega} \operatorname{div}(\lambda \nabla u^n) v d\Omega = \int_{\Omega} \lambda \nabla u^n \cdot \nabla v d\Omega - \int_{\partial\Omega} \lambda \frac{\partial u^n}{\partial \hat{\mathbf{n}}} v d\partial\Omega, \quad (54)$$

permite escrever (53) como

$$\int_{\Omega} \left[u^n v + \frac{\Delta t \lambda}{\rho c_p} \nabla u^n \cdot \nabla v \right] d\Omega = \int_{\Omega} [u^{n-1} v + \Delta t F^n v] d\Omega + \int_{\partial\Omega} \frac{\Delta t \lambda}{\rho c_p} \frac{\partial u^n}{\partial \hat{\mathbf{n}}} v d\partial\Omega. \quad (55)$$

Importa ressaltar que

$$\int_{\partial\Omega} \frac{\Delta t \lambda}{\rho c_p} \frac{\partial u^n}{\partial \hat{\mathbf{n}}} v d\partial\Omega = 0, \quad (56)$$

uma vez que $v \in V$, isto é, $v = 0$ sobre Γ_1 , e $\frac{\partial u^n}{\partial \hat{\mathbf{n}}} = 0$ sobre $\partial\Omega \setminus \Gamma_1$.

Levando em conta (56), de (55) obtém-se a formulação variacional contínua associada ao problema semi-discretizado no tempo em (52) que pode ser declarada da seguinte maneira: Dadas as funções u^{n-1} e F^n , para cada $n \in \mathcal{I}_N$, encontrar a função escalar $u^n \in V$ tal que

$$\int_{\Omega} [u^n v + \alpha \Delta t \nabla u^n \cdot \nabla v] d\Omega = \int_{\Omega} [u^{n-1} v + \Delta t F^n v] d\Omega, \quad \forall v \in V, \quad (57)$$

onde α é a difusividade térmica já definida em (23).

Com respeito a Eq. (49) que estabelece a condição inicial, a formulação variacional correspondente é obtida multiplicando tal equação pela função teste $v \in V$ e integrando na sequência sobre Ω , o que fornece

$$\int_{\Omega} u^0 v d\Omega = \int_{\Omega} [T_0 - T_a(0)] v d\Omega, \quad \forall v \in V. \quad (58)$$

As formulações fracas nas Eq.s (57) e (58) podem ser convenientemente escritas na notação usual $a_0(u^0, v) = L_0(v)$ e $a(u^n, v) = L(v)$ respectivamente, onde

$$a_0(u^0, v) := \int_{\Omega} u^0 v d\Omega, \quad (59)$$

$$L_0(v) := \int_{\Omega} (T_0 - T_a(0)) v d\Omega, \quad (60)$$

$$a(u^n, v) := \int_{\Omega} [u^n v + \alpha \Delta t \nabla u^n \cdot \nabla v] d\Omega, \quad n \in \mathcal{I}_N, \quad (61)$$

$$L(v) := \int_{\Omega} [u^{n-1} v + \Delta t F^n v] d\Omega, \quad n \in \mathcal{I}_N = \{1, \dots, N\}. \quad (62)$$

Assim, os problemas variacionais contínuos consistem em inicialmente encontrar $u^0 \in V$ tal que

$$a_0(u^0, v) = L_0(v), \quad \forall v \in V, \quad (63)$$

para em seguida, buscar por $u^n \in V$ satisfazendo

$$a(u^n, v) = L(v), \quad \forall v \in V, \quad n \in \mathcal{I}_N = \{1, \dots, N\}. \quad (64)$$

Observação 2.4.1. *A solução do problema modelo dado por um PVIC reside em um espaço de funções contínuas onde adicionalmente as derivadas também são contínuas. No entanto, o espaço de Sobolev $H^1(\Omega)$ permite funções com derivadas descontínuas. Esse enfraquecimento da exigência de continuidade das derivadas de u^n no problema variacional contínuo (64), proporcionado pela integração por partes, amplia substancialmente o leque de possibilidades de construção de espaços do método de elementos finitos.*

2.4.4.3 Formulação completamente discretizada

Para finalmente resolver numericamente o problema, precisa-se transformar os problemas variacionais contínuos dados nas Eq.s (63) e (64) nos correspondentes problemas variacionais discretos. Isso é feito considerando espaços tentativa e teste de dimensão finita. Neste caso, ambos os espaços coincidem, tendo sido denotados por $V_h \subset V$ e definidos pela Eq. (43). Seja u_h^0 uma aproximação para u^0 , solução de (63). Existem duas possibilidades para o cálculo de u_h^0 . Uma consiste em projetar $T_0 - T_a(0)$ no espaço V_h , ou seja, em resolver a Eq. (63) para v em V_h , e outra em tomar u_h^0 como sendo o interpolante de $T_0 - T_a(0)$ em V_h . De toda sorte, assumindo que u_h^0 já tenha sido calculada, pode-se focar atenção na busca por uma solução numérica da Eq. (64) cuja formulação variacional discreta pode ser declarada da seguinte maneira: Dada a função $u_h^0 \in V_h$, encontrar $u_h^n \in V_h$ tal que

$$a(u_h^n, v) = L(v), \quad \forall v \in V_h, \quad n \in \mathcal{I}_N = \{1, \dots, N\}. \quad (65)$$

O MEF é uma técnica numérica de construção de uma base adequada para o espaço V_h de modo que (65) resulte em um sistema de equações algébricas $\mathbb{A}\mathbf{u}^n = \mathbf{b}^n$ onde \mathbb{A} é uma matriz com propriedades interessantes do ponto de vista computacional, por exemplo a esparsidade, apenas para citar uma. Neste trabalho, usa-se uma formulação de elementos finitos clássica onde V_h é gerado por um conjunto linearmente independente de funções polinomiais por partes conhecidas como polinômios de Lagrange, isto é,

$$V_h = \text{span}\{\psi_j\}_{j \in \mathcal{I}_h}, \quad \mathcal{I}_h := \{1, \dots, N_h\}, \quad N_h = \dim V_h. \quad (66)$$

Assim, definida a base para o espaço V_h em (66), o MEF propõe uma solução discreta da forma

$$u_h^n = \sum_{j=1}^{N_h} u_j^n \psi_j, \quad (67)$$

onde os coeficientes u_j^n são determinados inserindo (67) em $a(u_h^n, \cdot)$ e impondo que $a(u_h^n, \cdot) = L(\cdot)$ seja satisfeita para as N_h funções testes $\psi_1, \dots, \psi_{N_h}$. Isso implica em

$$\sum_{j=1}^{N_h} a(\psi_j, \psi_i) u_j^n = L(\psi_i), \quad i \in \mathcal{I}_h, \quad (68)$$

que é exatamente um sistema linear de equações algébricas

$$\mathbb{A}\mathbf{u}^n = \mathbf{b}^n, \quad (69)$$

onde $\mathbf{u}^n = [u_1^n, \dots, u_{N_h}^n]^T$ é o vetor das incógnitas e as entradas de \mathbb{A} e \mathbf{b}^n são dadas

por

$$\begin{aligned}\mathbb{A}_{ij} &= a(\psi_j, \psi_i), \quad i, j \in \mathcal{I}_h, \\ b_i^n &= L(\psi_i), \quad i \in \mathcal{I}_h.\end{aligned}$$

Em implementações computacionais, em vez de determinar a matriz \mathbb{A} e o vetor \mathbf{b}^n diretamente de (68), o MEF define para cada elemento $K \in \mathcal{T}_h$, matrizes e vetores locais designadas respectivamente por \mathbb{A}_K e \mathbf{b}_K^n , e introduz um operador conhecido como operador de montagem (assembly em inglês), $\mathcal{A}_{K \in \mathcal{T}_h}$, cuja definição dada por

$$\begin{aligned}\mathcal{A}_{K \in \mathcal{T}_h} \mathbb{A}_K &= \mathbb{A}, \\ \mathcal{A}_{K \in \mathcal{T}_h} \mathbf{b}_K^n &= \mathbf{b}^n, \quad \text{para cada } n \in \mathcal{I}_t,\end{aligned}$$

permite calcular de maneira equivalente a matriz global \mathbb{A} e o vetor global \mathbf{b}^n .

Além disso, um cálculo imediato da matriz local \mathbb{A}_K revela que

$$\begin{aligned}\mathbb{A}_K &= a(\psi_j|_K, \psi_i|_K) \\ &= (\psi_j|_K, \psi_i|_K)_K + \alpha \Delta t (\nabla \psi_j|_K, \nabla \psi_i|_K)_K, \quad i, j \in \mathcal{I}_h^K := \{1, \dots, N_h^K\},\end{aligned}$$

pode ser escrita como

$$\mathbb{A}_K = \mathbb{M}_K + \alpha \Delta t \mathbb{B}_K, \quad (70)$$

introduzindo as matrizes locais \mathbb{M}_K e \mathbb{B}_K cujas as entradas $[\mathbb{M}_K]_{ij}$ e $[\mathbb{B}_K]_{ij}$ são dadas por

$$\begin{aligned}[\mathbb{M}_K]_{ij} &= (\psi_j|_K, \psi_i|_K)_K, \quad i, j \in \mathcal{I}_h^K := \{1, \dots, N_h^K\}, \\ [\mathbb{B}_K]_{ij} &= (\nabla \psi_j|_K, \nabla \psi_i|_K)_K, \quad i, j \in \mathcal{I}_h^K := \{1, \dots, N_h^K\}.\end{aligned}$$

Importa ressaltar que o inteiro positivo N_h^K é chamado de número de graus de liberdade local. No caso de polinômios lineares, temos $N_h^K = 3$.

A aplicação do operador de montagem, $\mathcal{A}_{K \in \mathcal{T}_h}$, às matrizes locais \mathbb{M}_K e \mathbb{B}_K leva a

$$\begin{aligned}\mathcal{A}_{K \in \mathcal{T}_h} \mathbb{M}_K &= \mathbb{M}, \\ \mathcal{A}_{K \in \mathcal{T}_h} \mathbb{B}_K &= \mathbb{B}.\end{aligned}$$

Na literatura do MEF, a matriz local \mathbb{M}_K e a matriz global \mathbb{M} são chamadas de matriz de massa local e matriz de massa global respectivamente. De igual modo, a matriz local \mathbb{B}_K e a matriz global \mathbb{B} são conhecidas como matriz de rigidez local e matriz de rigidez global respectivamente (BECKER ET AL., 1981).

Em seguida, são feitas algumas considerações a respeito da implementação computacional da Eq. (69).

2.4.5 Aspectos da implementação computacional

Ao invés de resolver a contrapartida discreta de (63), ou seja, de buscar por $u_h^0 \in V_h$ satisfazendo

$$a_0(u_h^0, v) = L_0(v), \quad \forall v \in V_h, \quad (71)$$

que significa projetar $u^0 = T_0 - T_a(0)$ sobre V_h através do problema variacional discreto (71), opta-se neste trabalho por tomar u_h^0 como sendo a interpolante de $u^0 = T_0 - T_a(0)$ em V_h , isto é, definindo $u_h^0 = \sum_{j=1}^{N_h} u_j^0 \psi_j$, simplesmente toma-se $u_j^0 = u^0(x_j, z_j)$, onde (x_j, z_j) são as coordenadas do nó j da triangulação \mathcal{T}_h . No entanto, ambas as operações podem ser implementadas computacionalmente.

O programa precisa executar todo processo de evolução no tempo, também conhecido como integração no tempo, resolvendo em cada nível de tempo $n \in \mathcal{I}_t$ o sistema de equações lineares $\mathbb{A}\mathbf{u}^n = \mathbf{b}^n$ para o vetor das incógnitas \mathbf{u}^n . Isso implica em calcular $a_0(\cdot, \cdot)$, $L_0(\cdot)$, $a(\cdot, \cdot)$ e $L(\cdot)$. Como pode-se ver, $a(\cdot, \cdot)$ não depende do tempo, o que significa que sua matriz associada \mathbb{A} também será independente do tempo, reduzindo substancialmente o custo computacional do código. Logo, a matriz \mathbb{A} decorrente de $a(\cdot, \cdot)$ pode ser calculada antes que o código entre no laço de integração no tempo, de modo que só precisa-se calcular o lado direito \mathbf{b}^n , correspondente a $L(\cdot)$, em cada iteração.

O procedimento de solução na forma algorítmica, introduzindo as variáveis `Uatual` para a função espacial desconhecida no nível de tempo corrente (\mathbf{u}^n) e `Uanterior` para a solução espacial em um nível de tempo precedente (\mathbf{u}^{n-1}), pode ser escrito na forma do seguinte pseudoalgoritmo:

1. Defina as condições de contorno de Dirichlet usando como dados de entrada a função prescrita na fronteira do tipo Dirichlet e as informações geométricas da triangulação \mathcal{T}_h restritas a fronteira de Dirichlet.
2. Se `Uanterior` é calculado via projeção da condição inicial dada, u^0 , sobre o espaço V_h , faça:
 - defina $a_0(\cdot, \cdot)$ e $L_0(\cdot)$
 - defina a matriz global \mathbb{M} via montagem de \mathbb{M}_K calculada a partir de $a_0(\cdot, \cdot)$
 - defina o vetor global \mathbf{b} via montagem de \mathbf{b}_K^0 calculada a partir de $L_0(\cdot)$
 - resolva o sistema linear $\mathbb{M}\mathbf{u} = \mathbf{b}$ e armazene \mathbf{u} em `Uanterior`
3. Senão, i.e, no caso de calcular `Uanterior` como interpolante de u^0 faça:
 - Defina `Uanterior` como sendo a interpolante de u^0 em V_h

4. Defina $a(\cdot, \cdot)$ e $L(\cdot)$
5. Defina a matriz \mathbb{A} via montagem das matrizes locais \mathbb{A}_K calculadas a partir de $a(\cdot, \cdot)$
6. Estabeleça algum nível de tempo N para finalização do processo de integração no tempo
7. Efetue a atribuição $n = 1$
8. Enquanto $n \leq N$ faça:
 - defina \mathbf{b} via montagem de \mathbf{b}_K^n calculado a partir de $L(\cdot)$
 - aplique as condições de contorno essenciais
 - resolva o sistema linear $\mathbb{A}\mathbf{u} = \mathbf{b}$ para incógnita \mathbf{u} e armazene em $\mathbf{U}^{\text{atual}}$
 - efetue a atribuição $n \leftarrow n + 1$
 - efetue a atribuição $\mathbf{U}^{\text{anterior}} \leftarrow \mathbf{U}^{\text{atual}}$ (necessária à etapa seguinte)

O pseudoalgoritmo apresentado fornece as ideias principais subjacentes ao código computacional que foi implementado na linguagem de programação do Matlab. Em Logg et al. (2012), há uma apresentação semelhante deste algoritmo e detalhes para sua implementação nas linguagens *Python* e *C++*.

Os aspectos técnicos do MEF intrínsecos tanto a transformação do problema variacional discreto em (65) no sistema de equações lineares em (69), quanto ao processo de montagem de matrizes e vetores é apresentado em diferentes referências como Hughes (1987); Becker et al. (1981).

Na seção seguinte, são introduzidos detalhes referentes as malhas adotadas neste trabalho.

2.5 Malhas

2.5.1 Geração

Na etapa de pré-processamento, foi delineada a geometria do domínio de estudo, um retângulo de 10 m de largura e 15 m de comprimento, bem como o arranjo duto-bloco-aletas, conforme mostrado na Fig. 10. Como já comentado, as dimensões do solo são suficientes para garantir condições adiabáticas nas laterais do domínio e na sua parte inferior (BRUM, 2016).

Essa primeira configuração padronizada é simétrica na direção horizontal. Quanto à direção vertical, o centro do bloco coincide com o centro do duto; assim, ele se encontra a uma profundidade inicial de 1.6 m. O bloco é quadrado com lado de 0.18 m, suficiente para conter a instalação do duto, o qual tem um diâmetro de 0.11 m, como

em Vaz (2011). No bloco são fixadas 4 aletas iguais, de 1 m de comprimento e 0.01 m de espessura.

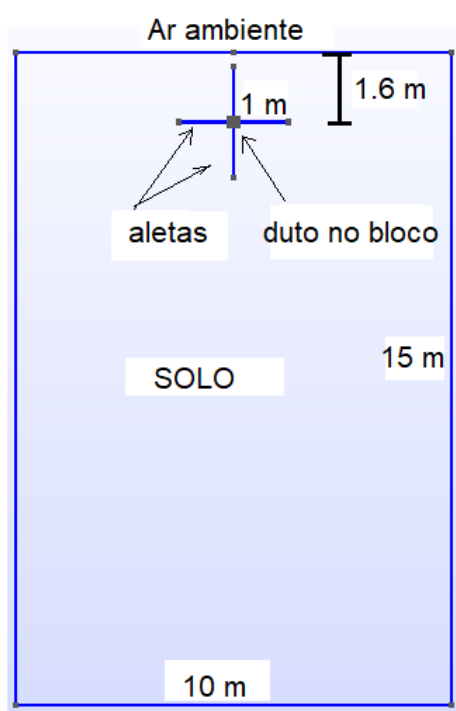


Figura 10: Corte transversal de uma configuração geométrica do problema.

As dimensões dos materiais galvanizados são uma primeira adaptação da configuração geométrica proposta em Hassanzadeh et al. (2018) para o caso de Vaz (2011). Uma diferença clara é que no trabalho de Hassanzadeh et al. (2018) as aletas são conectadas diretamente ao duto. Isso não foi feito aqui para manter uma região uniforme em torno do duto, possibilitando o uso de uma modelagem menos complexa, como é o caso do GAEA. De fato, Hassanzadeh et al. (2018) não chega a simular ou estimar o potencial térmico de um TCSA, mas foca no problema da melhoria da transferência de calor no solo.

Para gerar as malhas do domínio espacial, representado na Fig. 10, foi utilizado o software GMSH⁵. Antes de inserir as entidades geométricas nesse software, foram introduzidos os pontos que delimitam o terreno, os do bloco que contém o duto e, por fim, os das aletas. Cada ponto é inserido com 4 argumentos: as 3 coordenadas espaciais e a distância entre os pontos. Como foi usado domínios bidimensionais, a terceira coordenada espacial poderia assumir qualquer valor constante, escolhe-se zero. O quarto argumento afeta o tamanho dos elementos da malha conectados ao ponto. Mais precisamente, quanto menor o valor do quarto argumento, mais refinada

⁵O GMSH é um programa para a descrição, visualização e discretização de entidades geométricas (pontos, linhas, superfícies e volumes) em uma linguagem de programação capaz de descrever essas entidades e de configurar os parâmetros necessários para criação de malhas; tem um código aberto, livre e gratuito. (GEUZAIN AND REMACLE, 2020)

fica a malha em torno do ponto. Assim, cria-se dois parâmetros: um para controlar a distancia entre os pontos do contorno do domínio retangular, o qual é chamado *tpfora*; outro para controle nos pontos ligados ao bloco e às aletas, chamado *tamc*. Isto possibilitou fazer a malha mais refinada nas regiões próximas ao bloco e às aletas (onde podem ocorrer maiores variações de temperatura), usando uma malha menos refinada nas bordas do domínio. Uma amostra de como o refinamento da malha foi controlado com os parâmetros *tpfora* e *tamc* é fornecida na Fig. 11, onde o parâmetro *caixa* é a medida da lateral do bloco, isto é 0.18 m; os valores de *tpfora* são dados em m. A figura mostra ainda que foi adotado nesse trabalho o uso de elementos triangulares.

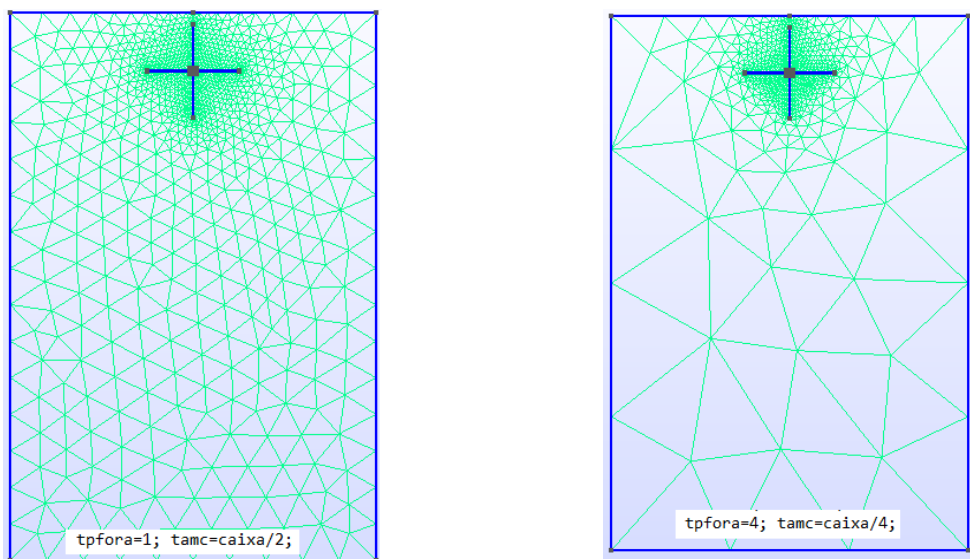
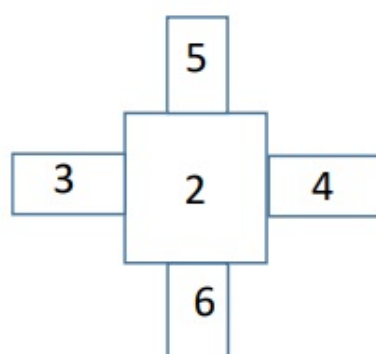


Figura 11: Exemplos de teste de malha em GMSH.

Com os pontos definidos, são inseridas as linhas (segmentos) que vão delimitar as superfícies e com elas são definidos os subdomínios ou *partes físicas* como são chamados no GMSH. Nestas simulações, trabalha-se com 6 subdomínios ordenados da seguinte maneira: solo (1), bloco quadrado (2), aleta esquerda (3), aleta direita (4), aleta superior (5) e aleta inferior (6); a estrutura é ilustrada na Fig. 12. No código de resolução por elementos finitos, isso permite definir para cada subdomínio uma propriedade física diferente. Por exemplo, no caso de uma simulação envolvendo as quatro aletas, pode-se definir que os subdomínios 2 a 6 tenham difusividade térmica de material galvanizado, enquanto o subdomínio 1 tenha difusividade térmica do solo. Por outro lado, em outra simulação onde a aleta esquerda é desconsiderada, então, pode-se usar a mesma malha anterior, apenas redefinindo a difusividade térmica do subdomínio 3, com difusividade térmica igual a do solo. Essas possibilidades são exploradas no Capítulo 3.



Solo: 1

Figura 12: Subdomínios definidos com GMSH.

Com todos os elementos geométricos definidos, as condições de contorno são estabelecidas e as malhas do domínio são geradas, completando assim a primeira etapa de pré-processamento.

2.5.2 Testes

Para evitar que a malha interferisse significativamente nos resultados, fez-se vários testes de independência de malha. Finalmente, após adotar um passo de tempo $\Delta t=1800$ s (meia hora) para a discretização temporal, como em Domingues et al. (2021), foram realizadas comparações dos vetores de solução das temperaturas ao longo de um ano no ponto em Ω de coordenadas $(x, z)=(5, 1.6)$, ou seja, na posição referente ao centro do duto e também centro do bloco. Em cada simulação (s), usando a norma do máximo⁶, comparou-se a diferença entre dois vetores solução, T^s , sucessivos das temperaturas ao longo do ano.

A Tabela 2 resume os últimos dados conclusivos para os testes de malha. São apresentados os valores dos parâmetros *tpfora* e *tamc* usados para fazer refinamentos diferenciados no domínio espacial Ω , o número de nós e de elementos triangulares utilizados em cada malha, os tempos aproximados de simulação do código de elementos finitos implementado no MATLAB (2010) e, por fim, a comparação das diferenças de temperatura entre soluções sucessivas.

A partir dos resultados da Tabela 2, seguindo sugestão em Domingues et al. (2021) que estabelece como critério de malha aquelas que proporcionam erros medidos na norma do máximo da ordem 10^{-4} , poderia se adotar tanto a malha da simulação s = 3 como a da simulação s = 4; escolheu-se a ultima que pode ser vista na Fig. 13.

⁶A norma do máximo de um vetor $x = (x_1, \dots, x_n)$ é definida por: $|x|_\infty = \max_{i=1, \dots, n} |x_i|$

Tabela 2: Dados finais dos testes de malha

s	tpfora (m)	tamc (m)	Nós	Elementos	Tempo (min)	Comparação $ T^{s+1} - T^s _{\infty}$ (°C)
1	1.2	0.09	1097	2137	2.6	
2	1.0	0.045	1396	2722	3.4	1.80×10^{-3}
3	0.9	0.0225	1657	3230	4.2	6.94×10^{-4}
4	0.8	0.01125	2017	3935	5.5	2.41×10^{-4}

A mesma figura também mostra uma vista ampliada da malha próxima a região do bloco e aletas, onde ela está mais refinada. Após esse estudo, padroniza-se ainda que ao adotar malhas diferentes neste trabalho, todas elas deveriam conter 2000 ou mais nós e/ou 4000 ou mais elementos.

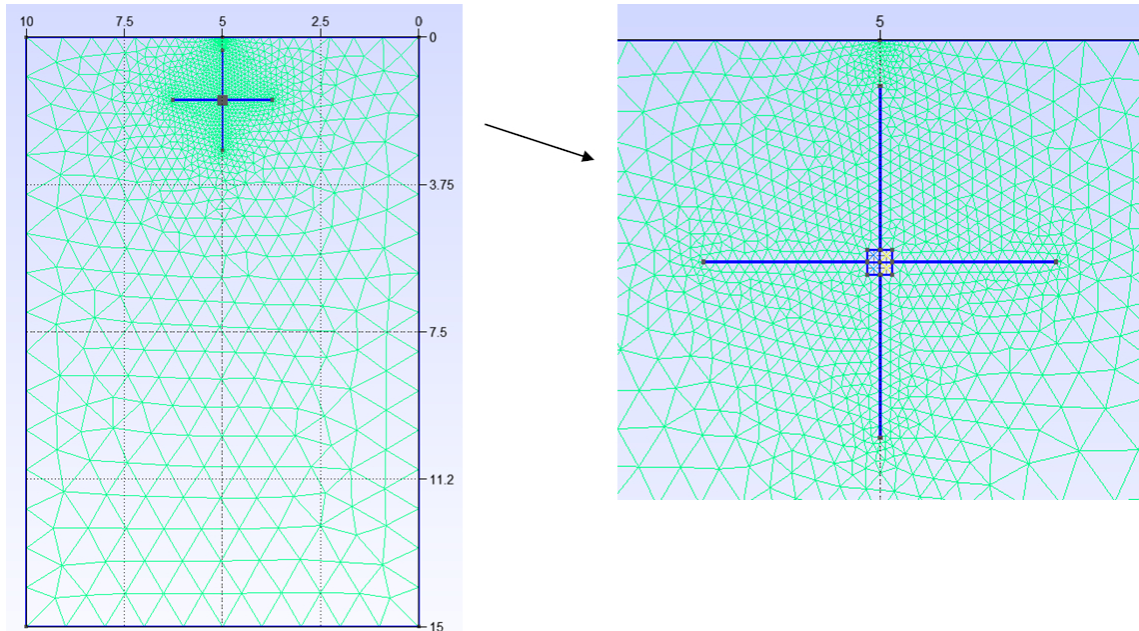


Figura 13: Malha selecionada com 3935 elementos.

2.6 Parâmetros de estudo

Para concluir a metodologia, é necessário estabelecer algumas definições que serão úteis para gerar resultados numéricos.

Define-se nesta dissertação, o potencial térmico do solo, P_s como sendo a diferença entre as temperaturas do solo, T_s , e do ar na entrada do TCSA, T_{ent} . Cabe observar que neste trabalho considera-se $T_{ent} = T_a$, onde T_a é a temperatura do ar ambiente junto à superfície do solo.

Nota-se ainda que a temperatura do ar é baseada nos dados de Vaz (2011) referentes à cidade de Viamão para o ano 2007 e foi dada na Eq. (29). Além disso, como feito em outras referências (BRUM ET AL., 2019), define-se o potencial térmico dos

TCSA, P_t , como sendo a diferença entre as temperaturas na saída, T_{sai} , e na entrada dos dutos, T_a . Assim, em um tempo t , os valores instantâneos desses potenciais são dados, respectivamente, por:

$$P_s(t) = T_s(t) - T_a(t) \quad (72)$$

$$P_t(t) = T_{sai}(t) - T_a(t). \quad (73)$$

Outro aspecto relevante na literatura dos TCSA é a melhora de sua eficiência que, a qualquer instante, é dada pela razão entre os potenciais térmicos do TCSA e do solo (BRUM ET AL., 2019), isto é:

$$\theta = \frac{P_t}{P_s}. \quad (74)$$

Assim, quanto maior a eficiência dos TCSA, mais próximos estão os dois potenciais, o do TCSA e o do solo.

Por outro lado, como observado em Brum (2016), esta fórmula é inconveniente, particularmente em estações como a primavera ou outono quando P_s pode ficar próximo, ou igual, a zero. Assim, a mesma referência propôs a seguinte fórmula para o cálculo da eficiência anual dos TCSA:

$$\theta = \frac{\sqrt{\int_0^{365} P_t^2 dt}}{\sqrt{\int_0^{365} P_s^2 dt}}, \quad (75)$$

onde os valores dos potenciais são ajustados, por mínimos quadrados, a funções periódicas do tipo:

$$P(t) = P_m + A \text{sen}(\omega t + \phi). \quad (76)$$

Aqui, P_m , A , ω e ϕ são, respectivamente, o valor médio, amplitude, frequência angular e fase da função potencial. Pode-se ver, por exemplo, que a temperatura do ar em Viamão, dada pela Eq. (29), está escrita nessa forma, onde $\omega = 2\pi/\tau$ e o período, $\tau = 365$ dias, ou seja, um ano.

Para utilizar fórmulas como as da Eq. (75), todos os resultados dessa dissertação foram ajustados por mínimos quadrados a funções periódicas similares às da Eq. (76). Isso foi feito utilizando um código no Matlab, seguindo o algoritmo dado por Brum et al. (2015).

Por fim, no Capítulo 3 são feitas diferentes comparações de resultados adotando como métrica o valor médio quadrático (RMS) das diferenças anuais entre duas funções. Assim, considerando duas funções periódicas f e g de variável independente t (tempo), dado em dias, escritas como na Eq. (76), calcula-se o valor RMS da diferença

anual entre essas funções pela fórmula

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{\int_0^{365} [f(t) - g(t)]^2 dt}{365}}. \quad (77)$$

3 RESULTADOS

3.1 Validação e verificação do modelo

Este capítulo apresenta a validação do modelo adotado neste trabalho, comparando seus resultados com os dados experimentais de Vaz (2011), relativos a uma instalação de TCSA em Viamão. Os parâmetros que foram considerados por Vaz (2011) para a modelagem já apresentados na Seção 2.1 são: o comprimento do duto $L_0 = 25.77$ m, seu diâmetro $D_0 = 0.11$ m, e a profundidade da instalação $z_0 = 1.6$ m. Estes mesmos valores servem de referência inicial nesse estudo acrescentando a velocidade de escoamento do ar na entrada dos dutos, $v_0 = 3.3$ m/s. Isso corresponde a uma vazão de ar $\dot{m}_0 = 0.0364$ kg/s. As demais propriedades termofísicas do ar e do solo encontram-se na Tabela 1. Por fim, a temperatura do ar em Viamão foi modelada com a Eq. (29).

Em Domingues et al. (2021), é feita uma validação do modelo GAEA, relativa aos mesmos dados experimentais, calculando o campo de temperaturas no solo por uma metodologia unidimensional. Os resultados de Domingues et al. (2021) são utilizados aqui para a verificação do modelo.

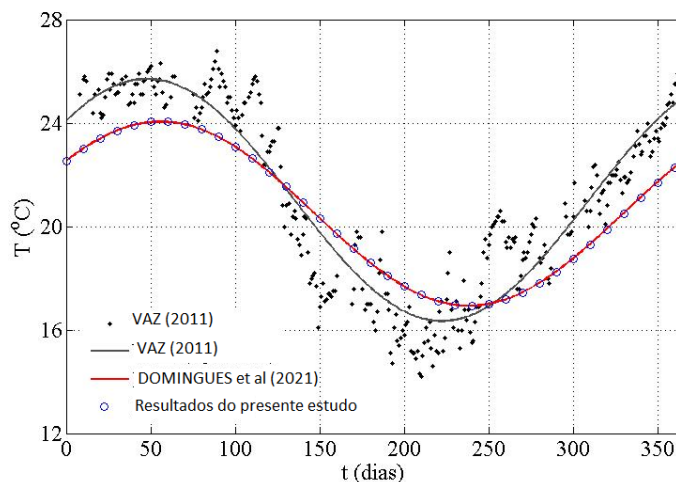


Figura 14: Comparação dos resultados do modelo atual com dados experimentais e outros resultados numéricos.

A Fig. 14 apresenta uma comparação entre:

- (1) os resultados, obtidos experimentalmente, das médias diárias (discretas) de temperatura na saída do TCSA, conforme Vaz et al. (2011);
- (2) uma curva ajustada por mínimos quadrados desses mesmos dados, seguindo uma função periódica semelhante a dada na Eq. (76);
- (3) os resultados numéricos de Domingues et al. (2021);
- (4) os resultados numéricos do presente estudo.

Analogamente a Domingues et al. (2021), o coeficiente de correlação de Pearson entre os resultados obtidos neste trabalho e os dados experimentais é de aproximadamente 0.89, o que indica uma correlação forte entre eles. Tal coeficiente de correlação foi calculado usando a função *corrcoef()* do MATLAB (2010). Estimou-se a diferença anual RMS entre os valores do modelo e os experimentais em aproximadamente 1.45°C . Portanto, como os resultados do presente estudo são muito aproximados aos de Domingues et al. (2021), como se vê na Fig. 14, conclui-se pela validade da metodologia aqui utilizada, a qual fornece resultados altamente correlatos aos experimentais. Mais ainda, pode-se ver que a metodologia é eficaz computacionalmente, pois as simulações podem ser feitas em poucos minutos (ver Tabela 2).

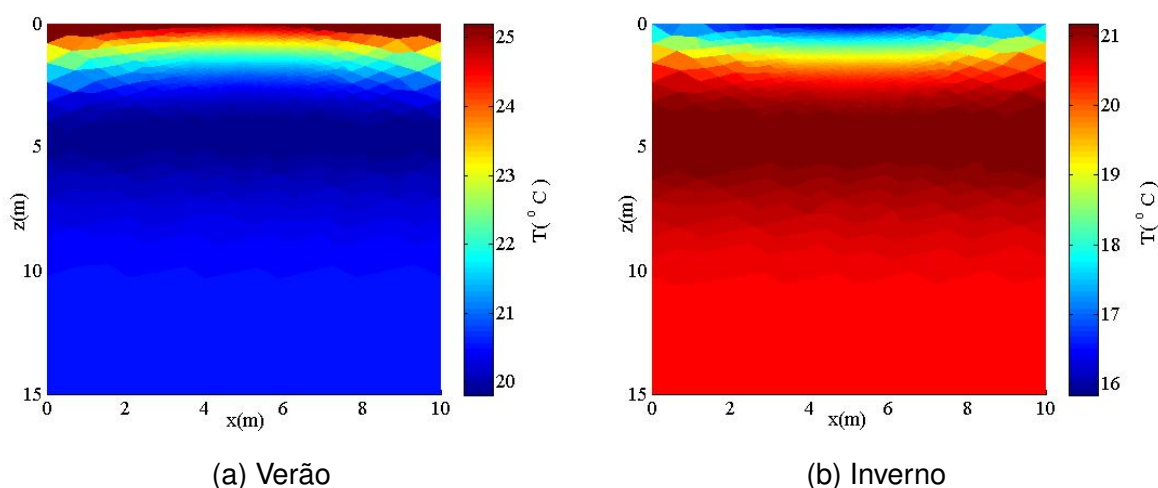


Figura 15: Campos de temperatura média diária do solo no verão e inverno.

Finaliza-se a seção com a apresentação dos campos de temperatura do solo durante as quatro estações do ano. No verão, a temperatura média diária do ar está em torno de 25°C e a temperatura mínima do solo, antes dos 5 m de profundidade, em torno de 20°C . Já no inverno, a temperatura média diária do ar baixa para 16°C , enquanto a temperatura máxima do solo está em 21°C antes dos 5 m de profundidade. Com esta análise gráfica, Fig. 15, pode-se estimar que, nas estações extremas, a magnitude máxima do potencial térmico do solo é de aproximadamente 5°C .

Replicando a análise gráfica para o outono e a primavera, Fig. 16, a magnitude do potencial térmico do solo, considerando 5 m de profundidade, estima-se que cai para a metade em relação ao verão e inverno, 2.5°C .

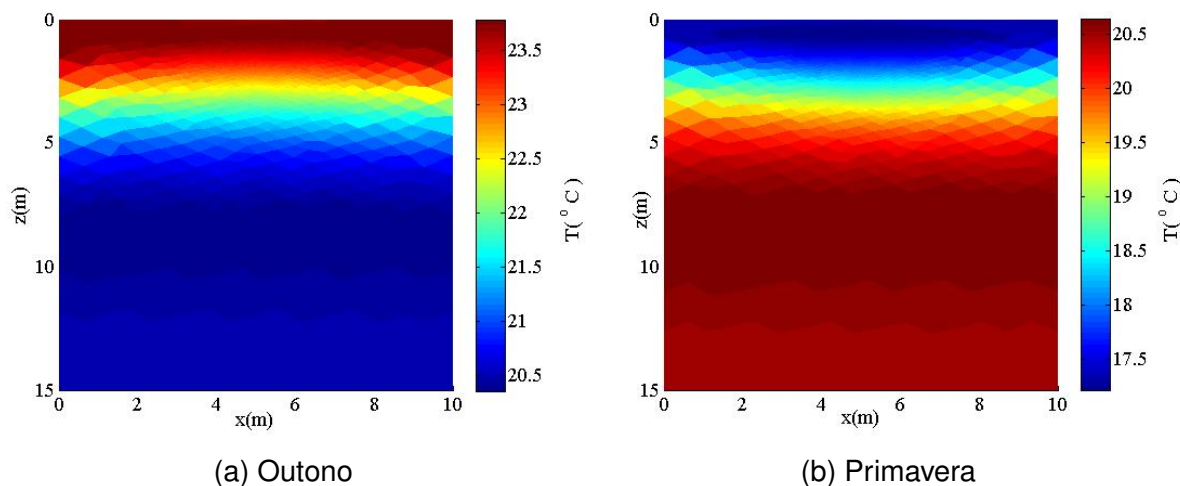


Figura 16: Campos de temperatura média diária do solo no outono e primavera.

3.2 Introdução do bloco e das aletas galvanizadas

Foi usada a malha da Fig. 13 para testar as treze diferentes configurações ilustradas na Fig. 17, com o duto a 1.6 m de profundidade. Na Fig. 17(a) estão representados os subdomínios mostrados também na Fig. 12. Importa observar, por exemplo, que a Fig. 17(b) reproduz a situação de um duto reto e horizontal, sem aletas, como no trabalho experimental de Vaz (2011); enquanto que a Fig. 17(n) reproduz o caso do duto envolto pelo bloco ao qual são ligadas quatro aletas.

Os testes foram realizados executando um código criado no MATLAB para resolver o PVIC que modela o problema. Para utilizar a mesma malha nos diferentes casos, foi definido, no script do programa computacional, um vetor de difusividades térmicas com 6 entradas que correspondem aos 6 subdomínios. Assim, a entrada 1 é o solo, a 2 o bloco, 3 e 4 as aletas lateral esquerda e direita (nessa ordem), 5 e 6 as aletas verticais superior e inferior (também nessa ordem). Desse modo, ao fazer a simulação do caso 2 (Fig. 17(d)), por exemplo, a difusividade térmica das entradas 1, 3, 4 e 6 é a mesma do solo; enquanto a difusividade das entradas 2 e 5 são iguais a do material galvanizado, usando os valores apresentados na Tabela 1; então apenas o bloco e a aleta superior são considerados com material galvanizado enquanto o resto do domínio é entendido como sendo composto por solo.

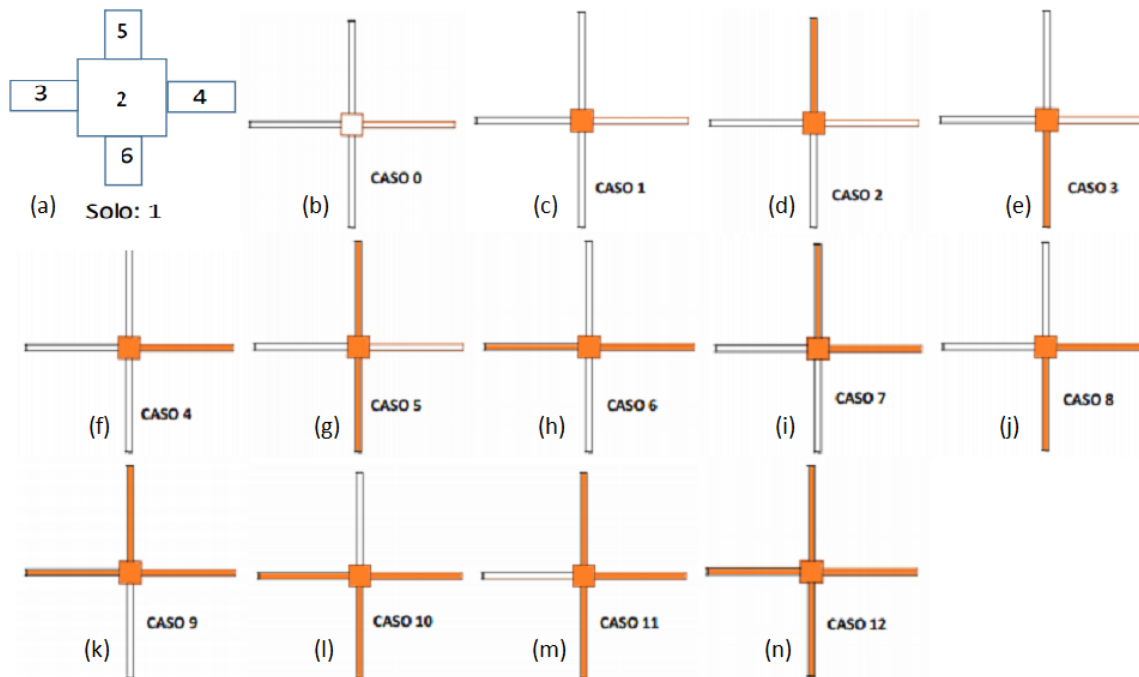


Figura 17: Configurações para o duto, o bloco e as aletas.

Em cada um dos treze testes, após a resolução numérica do PVIC usando o MEF, os resultados da temperatura na posição central do duto foram ajustados a funções periódicas senoidais similares as da Eq. (76). Como foi comentado na Seção 2.6, o ajuste seguiu o algoritmo proposto em Brum et al. (2015). Vale ressaltar que essas funções ajustadas correspondem a temperatura T_s , tomada como entrada para o modelo GAEA (ver Eq. (7)) e para o cálculo do potencial do solo (Eq. (72)). A seguinte etapa da simulação envolveu aplicar o modelo GAEA que retorna as temperaturas na saída do duto (Eq. (12)). Por fim, as temperaturas na saída são novamente ajustadas por mínimos quadrados a funções periódicas. Isso permite encontrar o potencial térmico do TCSA, conforme a Eq. (73), calcular sua eficiência usando a Eq. (75) e obter os valores RMS através da Eq. (77).

Concluídas as simulações, a comparação entre os casos foi feita adotando como métrica o valor RMS anual dos potenciais térmicos do solo obtidos em cada caso. Esses valores estão resumidos na Tabela 3. Embora já tenha-se observado que as magnitudes máximas do potencial local são da ordem de 5°C (que ocorrem no verão e no inverno), é preciso entender que os números da tabela correspondem a valores médios anuais e, por isso, são da ordem de 2°C . De fato, na primavera e no outono, há momentos em que o potencial térmico do solo é próximo de zero.

A partir da Tabela 3, observa-se que o caso 3 fornece o maior valor RMS do potencial térmico do solo, 2.65°C , seguido imediatamente pelos casos 8 e 10 que têm um RMS de 2.64°C . Escolhe-se o caso 3 por que nele é usado menos material galvanizado pois tem só uma aleta enquanto os outros usam duas ou três aletas; sendo,

portanto, a configuração 3 mais simples e econômica. Esta configuração já havia sido apresentada anteriormente na Fig. 3 e foi utilizada para as simulações subseqüentes deste capítulo.

Apesar de um número maior de aletas aumentar a condutividade geral do solo ao redor do duto, bem como a capacidade de dissipação do fluxo térmico, como é apontado em Hassanzadeh et al. (2018), isto não implica no aumento do potencial térmico do solo na região do duto como mostra um estudo correlato na seção 3.4.

Tabela 3: Valores RMS anuais do potenciais térmico do solo e do TCSA para os diferentes casos

Casos	Descrição	$P_{s,RMS}(^{\circ}\text{C})$	$P_{t,RMS}(^{\circ}\text{C})$
0	Sem aletas nem bloco	2.58	1.90
1	Com bloco	2.58	2.47
2	Aleta superior	2.46	2.36
3	Aleta inferior	2.65	2.53
4	Aleta lateral	2.58	2.47
5	Duas aletas: superior e inferior	2.53	2.42
6	Duas aletas laterais	2.58	2.47
7	Duas aletas: superior e lateral	2.47	2.36
8	Duas aletas: inferior e lateral	2.64	2.53
9	Três aletas: superior e laterais	2.48	2.37
10	Três aletas: inferior e laterais	2.64	2.52
11	Três aletas: superior, inferior e lateral	2.53	2.42
12	Quatro aletas	2.53	2.42

Outra análise complementar é feita na Tabela 3: os casos 8 e 10, que apresentam o maiores valores do potencial térmico do solo junto com o caso 3, também incluem a aleta inferior, porém não está presente a aleta superior. Pode-se interpretar fisicamente que a aleta superior influencia negativamente os resultados, pois ela aumenta a influência térmica da superfície do solo na região do duto.

3.3 Efeito de adicionar o bloco e a aleta

Uma comparação das medias diárias das temperaturas do ar ambiente, com as do solo e as de saída do TCSA é feita a partir dos gráficos das Fig. 18 e 19.

As primeiras simulações foram feitas com as condições do trabalho de Vaz (2011), ou seja, sem utilizar bloco nem aletas e com o duto instalado a 1.6 m de profundidade. Essa situação é mostrada na Fig. 18. Como era de esperar, a temperatura de saída do TCSA encontra-se entre a do ar e a do solo. A comparação do potencial térmico do TCSA com o do solo é o que foi definido como eficiência do TCSA na seção 2.6, determinada pela Eq. (75). Na configuração sem bloco e sem aletas, a eficiência do TCSA é de aproximadamente 73%.

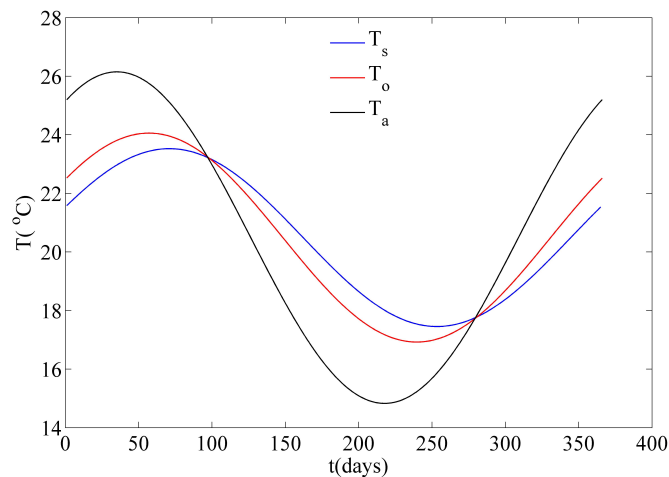


Figura 18: Sem material galvanizado - caso 0.

Na Fig. 19 pode-se observar o ganho térmico com a incorporação do bloco e a aleta inferior, correspondente ao caso 3 da seção 3.2. Após acoplar o duto com o bloco e a aleta, houve um aumento considerável na eficiência do TCSA, pois as temperaturas de saída do duto estão mais próximas (praticamente iguais) das temperaturas do solo. Pode-se estimar graficamente que os picos de magnitude do potencial térmico, tanto no verão quanto no inverno, estão próximos de 4°C no caso 3. O aumento considerável da eficiência do TCSA com a incorporação dos materiais galvanizados é confirmado com o cálculo, atingindo um valor de aproximadamente 95%.

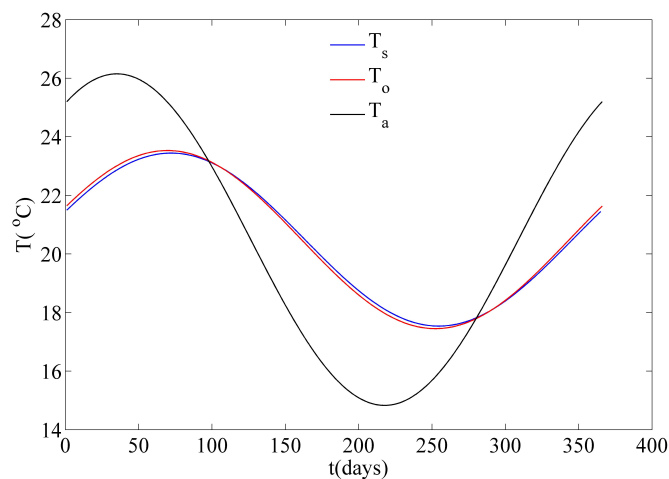


Figura 19: Com material galvanizado - caso 3.

Ainda, com os valores da Tabela 3 é calculada a melhora, em porcentagem, no potencial térmico do TCSA com a incorporação da aleta inferior em comparação ao caso convencional, duto reto sem bloco nem aletas, resultando em um valor aproximado de 33%¹.

¹ $\frac{2.53-1.90}{1.90} 100\%$

3.4 Estudo do enriquecimento da condutividade térmica

Um novo estudo foi realizado para entender como o aumento de material condutor ao redor do duto afeta o desempenho dos TSCA. O objetivo aqui é diferente do trabalho de Hassanzadeh et al. (2018), que foi citado como uma das principais referências do presente trabalho. O objetivo daqueles autores foi maximizar a dissipação de calor entre o duto e o solo, recorrendo ao uso de aletas com alta condutividade térmica. Eles concluíram que todos os casos integrados com aletas galvanizadas ampliavam as trocas térmicas do duto com o solo, e que, nesse sentido, a configuração com maior número de aletas fornecia o máximo desempenho térmico.

Dessa forma, considerando que as configurações utilizadas por eles são análogas às apresentadas na Fig. 17, ao iniciar esta pesquisa, supunha-se que o caso 12 daria os melhores resultados, ao invés do caso 3, como mostrado na seção 3.2. Essa discrepância ocorre porque aqueles autores avaliaram o desempenho térmico do TSCA considerando apenas o fluxo de dissipação de calor entre o duto e o solo. Eles não fizeram estimativas do potencial térmico dos TSCA, do potencial térmico do solo, nem da eficiência como estudado nessa dissertação.

O aumento da condutividade térmica do solo ao redor do duto melhora as trocas térmicas, no entanto, como visto a frente, um aumento excessivo dessa condutividade pode não melhorar o potencial térmico dos TSCA. Para analisar essa questão física hipotética, foram feitas simulações bidimensionais onde assume-se que uma região circular ao redor do duto encontra-se preenchida de um material galvanizado de alta condutividade, enquanto o resto do domínio possui a mesma condutividade térmica do solo. Essa ideia é ilustrada na Fig. 20, onde a região galvanizada tem a forma de um disco de raio r , centrado em x_0 e z_0 (que também são as coordenadas do centro do duto).

Nesse estudo, a área do disco galvanizado ocupou diferentes proporções da área total do domínio computacional. As variações levaram em conta as seguintes considerações:

- Os limites de variação de r são 0 e 1.6 m.
- A área do domínio computacional é uma constante $A_c = 150 \text{ m}^2$, enquanto a área do disco (A_d) varia em função de r .
- A proporção percentual entre a área do disco e a do domínio é dada por

$$A = \frac{A_d}{A_c} 100\% = \frac{\pi r^2}{1.5} \%$$

- As simulações foram divididas em oito casos, variando A de 0% a 5%.

Em relação ao restante da modelagem dos TCSA, na geometria do duto, foram utilizados os mesmos parâmetros descritos em Vaz (2011), ou seja, o comprimento assume o valor de 25.77 m e o diâmetro de 0.11 m. Basicamente segue-se a mesma metodologia utilizada anteriormente, mas ao invés de configurações com blocos e aletas, passa-se a adotar domínios semelhantes aos da Fig. 20.

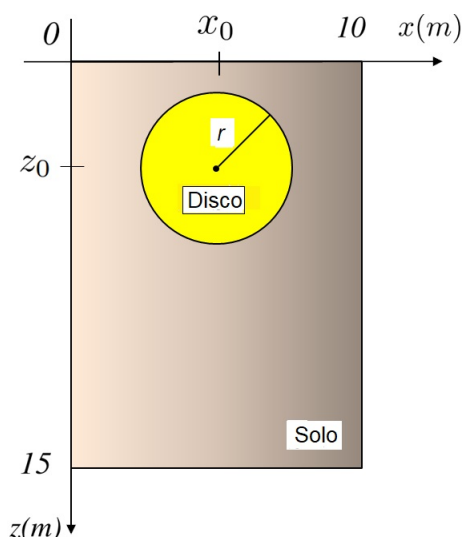


Figura 20: Exemplo do domínio computacional com disco galvanizado.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos nos oito casos simulados, onde fica evidenciado que os valores RMS anuais dos potenciais térmicos do solo e do TCSA aumentam com a redução da área do disco. Nessa configuração cabe notar ainda que não há ganho no potencial térmico do solo com a inclusão da região galvanizada na forma de disco. Nota-se que o maior potencial térmico do solo é justamente aquele em que a área do disco é nula. Por outro lado, há um ganho no potencial térmico dos TCSA (em relação ao caso sem disco algum) porque a eficiência térmica melhora com o aumento da condutividade térmica, assumindo valores próximos de 95%.

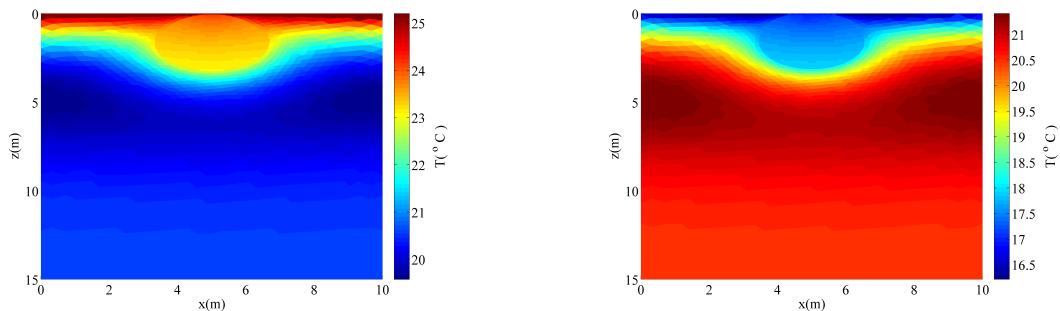
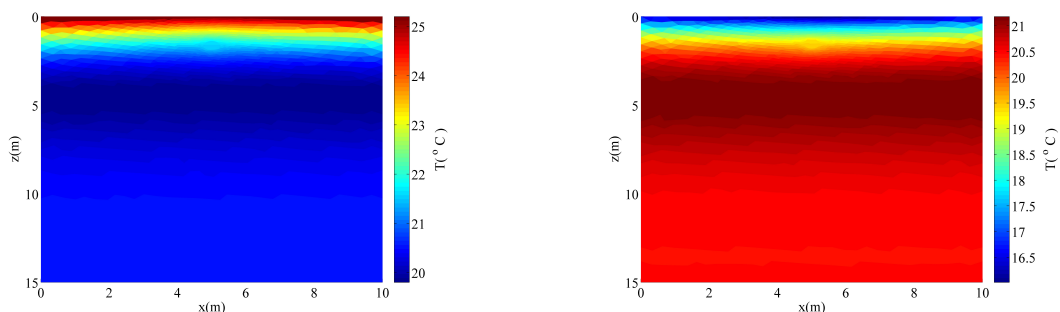
Observa-se que para valores de A igual ou menores do que 0.1%, o disco galvanizado não afeta mais o potencial térmico do solo o qual atinge o valor do caso de referência. Cabe lembrar que o lado do bloco quadrado introduzido nas simulações deste trabalho tem um valor de 0.18 m, ou seja, sua área representa cerca de 0.02% do domínio computacional. Logo, a escolha do tamanho do bloco considerada neste trabalho não afeta o potencial térmico do solo. Adicionalmente, deve-se observar que para $A = 0.1\%$ obtêm-se os maiores valores dos potenciais térmicos do solo e do TCSA.

Para uma análise gráfica, a partir do estudo dos campos de temperaturas, foram escolhidos dois dos casos: $A = 5\%$ e $A = 0.1\%$.

Tabela 4: Resultados com a variação do disco galvanizado.

A(%)	r(m)	$A_d(m^2)$	$P_s(^{\circ}C)$	$P_t(^{\circ}C)$	Eficiência(%)
5	1.6	8.04	1.34	1.3	94.9
4	1.38	5.98	1.83	1.76	94.8
3	1.2	4.52	2.13	2.04	94.9
2	0.97	2.96	2.33	2.23	94.9
1	0.69	1.5	2.48	2.37	94.9
0.5	0.49	0.75	2.54	2.43	94.9
0.1	0.22	0.15	2.58	2.46	94.9
0	0	0	2.58	1.9	73.0

A Fig. 21 apresenta os campos de temperaturas no verão (esquerda) e no inverno (direita), com a área do disco ocupando 5% do domínio computacional. Pode-se observar que a presença de um grande disco (ou de uma larga região galvanizada) faz com que a região ao redor do duto seja fortemente influenciada termicamente pelo que ocorre na superfície. Ao contrário do desejado, devido à alta condutividade, tanto no verão, como no inverno, as temperaturas na posição do duto se aproximam daquelas da superfície. Consequentemente, isso reduz o potencial térmico dos TCSA.

Figura 21: Campos de temperatura para $A = 5\%$.Figura 22: Campo de temperatura para $A = 0.1\%$.

A situação descrita é bem contrastada observando-se a Fig. 22, onde o disco ocupa uma proporção de apenas 0.1% do domínio. Nesse caso, as temperaturas na região

do duto estão bem mais distintas daquelas da superfície, possibilitando assim um maior potencial térmico para os TCSA.

A Fig. 23 apresenta as curvas das temperaturas do ar e da saída do TCSA, com o disco ocupando as proporções de 5% e 0.1%. Percebe-se que o potencial do TCSA é maior para a proporção 0.1% pois a diferença com a temperatura do ar é maior que para a proporção de 5%.

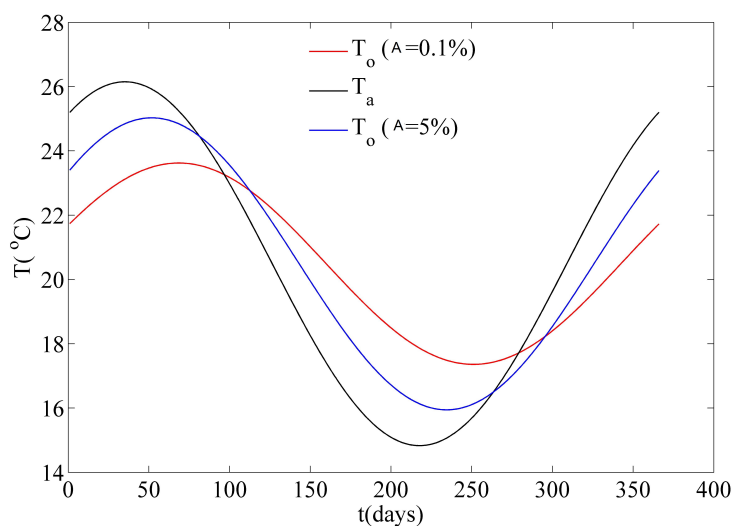


Figura 23: Comparação entre as temperaturas anuais do ar e da saída.

Resumindo, uma região ao redor do duto com alta condutividade térmica possibilita aumentos significativos nas capacidades de trocas térmicas e também na eficiência. Por outro lado, isso não significa melhoria do potencial térmico dos TCSA (nem do solo), pois este depende de um aumento na diferença de temperaturas entre a da superfície e o ponto de localização dos dutos. Como o objetivo do trabalho de Hasanzadeh et al. (2018) foi maximizar as trocas térmicas no domínio, isto é obtido aumentando o número de aletas e com uma configuração como o caso 12 da Fig. 17(n). Porém, os resultados desse estudo complementar mostram que tal configuração não é ideal, pois a temperatura na região dos dutos passa a ter mais influência da superfície. Isso não ocorre na configuração 3 da Fig. 17(e), que forneceu melhores resultados.

É importante finalizar essa seção observando que os resultados do potencial térmico do solo não se generalizam para qualquer configuração. Ou seja, é possível aumentar também o potencial térmico do solo com a inserção de uma região galvanizada ao redor do duto, apenas não convém adotar uma região circular.

3.5 Variação da profundidade da instalação usando uma aleta

Escolhendo configurações com apenas uma aleta inferior, foi realizada outra etapa de simulações, variando a profundidade do arranjo duto-bloco-aleta com o objetivo de avaliar o valor RMS anual do potencial térmico do solo. Como visto na Tabela 5, pode-se observar que variou-se a profundidade entre 1.6 m e 5.6 m, determinando-se também o aumento relativo e a eficiência com cada variação.

Tabela 5: Ganhos relativos dos valores eficazes anuais (RMS) para o potencial térmico do solo variando a profundidade de um em um metro.

Profundidade (m)	$P_{s,RMS}$ ($^{\circ}C$)	Aumento relativo (%)	Eficiência (%)
1.6	2.65	-	94.9
2.6	3.50	32.1	94.7
3.6	3.98	13.7	94.6
4.6	4.20	5.8	94.5
5.6	4.28	1.7	94.5

Como esperado de simulações análogas na literatura (BRUM ET AL., 2012; HERMES ET AL., 2020), os resultados mostram um aumento do potencial térmico do solo com o aumento da profundidade da instalação. No entanto, considerando que o aumento da profundidade implica aumento dos custos da escavação, é importante saber os ganhos relativos em potencial. Por exemplo, em termos de valores anuais RMS, o aumento relativo entre colocar o duto a 5.6 m ao invés de 4.6 m é inferior a 2%. Assim, não se avalia como recomendável utilizar uma instalação a mais de 4.6 m de profundidade. Os resultados indicam também que variar de 1.6 m para 2.6 m fornece o maior aumento relativo de pouco mais de 32%. Em Brum (2016), cuja referência é a mesma instalação deste trabalho, já tinha-se observado ganhos significativos até uma profundidade de 3 metros, que passou a ser recomendada. Deve-se observar que a eficiência mantém-se com valores acima de 94% com uma ligeira diminuição com o aumento da profundidade.

Tabela 6: Ganhos relativos de meio em meio metro.

Profundidade (m)	$P_{s,RMS}$ ($^{\circ}C$)	Aumento relativo (%)
1.6	2.65	-
2.1	3.14	18.04
2.6	3.50	11.46
3.1	3.78	8.0
3.6	3.98	5.29

Tentando melhorar ainda mais este valor, considerando que se escavar menos, os custos de instalação diminuem, novas simulações foram feitas, de meio em meio metro; os novos resultados se intercalam com os já existentes, apresentados na Tabela 6.

Finalmente, apresenta-se na Fig. 24 o comportamento das temperaturas do ar, do solo e da saída do TCSA considerando as variações da profundidade da instalação entre 1.6 e 4.6 m, de um em um metro. Na Tabela 5 mostra-se que a eficiência é superior a 90%, por isso, para cada caso, as curvas das temperaturas do solo e da saída dos dutos ficam próximas porém elas vão se separando, muito levemente, com a profundidade pois a eficiência vai diminuindo. A mesma figura ilustra também que as variações na temperatura do solo vão se reduzindo com o aumento da profundidade, o que explica a redução progressiva nos aumentos relativos do potencial térmico do solo, vistos na Tabela 5. Pode-se observar também que a amplitude dos gráficos diminui com a profundidade em consonância com o fato de que a temperatura torna-se quase constante com a profundidade aproximando-se ao valor da temperatura média da região.

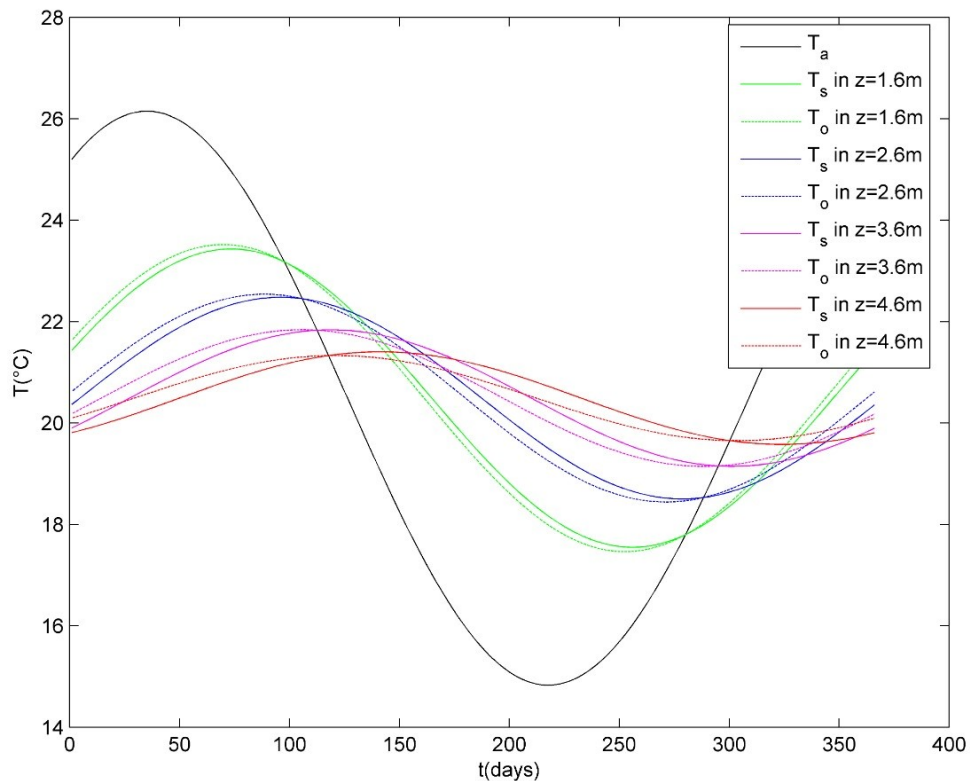


Figura 24: Temperaturas anuais comparativas a diferentes profundidades.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As considerações a seguir seguem a linha dos objetivos traçados para este trabalho:

- O objetivo central deste estudo teórico foi a avaliação do desempenho térmico do TCSA após acoplar ao duto, um bloco e aletas galvanizadas. Uma das conclusões mais relevantes é que a incorporação destas estruturas galvanizadas aumenta o potencial térmico do solo circundante e, conseqüentemente, também do TCSA.
- O modelo numérico do TCSA adotado, além de validado e verificado, possibilitou um menor custo computacional e o tratamento de uma geometria complexa bidimensional para o domínio.
- Das várias possibilidades estudadas para a configuração das aletas, a incorporação de uma única aleta inferior foi indicada como a que cumpre, com maiores valores do RMS, o propósito de aumentar o potencial térmico e eficiência dos TCSA, sendo aliás, a opção mais econômica em relação à quantidade de material. A configuração adotada, resultou em um aumento da eficiência anual de quase 95% do sistema. Este valor representa um importante incremento na eficiência de um TCSA convencional tomado como referência, que tem uma eficiência de quase 73%.
- O resultado do estudo paramétrico rendeu valores que concordam com estudos anteriores sobre o assunto. Especificamente, aponta-se neste trabalho que a instalação do duto aletado pode ser feita, com significativo benefício, a uma profundidade de 2,6 m. Considera-se que a possibilidade de reduzir ainda mais este valor pode continuar a ser estudada dado o impacto importante nos custos de escavação.
- Para o estudo do desempenho do TCSA foi considerando seu potencial térmico e sua eficiência. A incorporação da aleta inferior, alias de melhorar a eficiência nos valores já citados, aumentou o seu potencial térmico em 33%.

- Um estudo complementar foi realizado para compreender mais profundamente o efeito do aumento da condutividade térmica, ao redor do duto, no desempenho do TCSA. Para tanto, foi considerado um disco galvanizado, de raio variável com centro no centro do duto. Os resultados mostram que uma região ao redor do duto com alta condutividade térmica possibilita aumentos significativos nas capacidades de trocas térmicas e também na eficiência, porém isso não significa melhoria do potencial térmico dos TCSA.

Os resultados apresentados e a análise realizada para as diferentes configurações de aletas, deixam o caminho aberto a trabalhos futuros para a busca de outras configurações geométricas que continuem melhorando o desempenho do TCSA. Essa busca pode ser realizada com a aplicação de um método de avaliação geométrica mais específico como o Design Construtal. Essa pesquisa deveria ser focada no estudo das configurações que estendem o contato com o solo na direção da aleta inferior para resgatar o potencial térmico do solo a maiores profundidades.

Os TCSAs se apresentam como uma opção sustentável que consome menos energia do que os sistemas convencionais de aquecimento e resfriamento de edifícios, com custos mais baixos e com a vantagem de possuir uma tecnologia simples cujo estudo tem se intensificado tanto no Brasil quanto no mundo. Um aspecto importante, necessário para complementar este trabalho, é o levantamento de custos para a construção e instalação do TCSA proposto. Principalmente custos do material e mão de obra para comparar com a construção e instalação de um TCSA convencional, ou seja, com duto reto sem aletas.

REFERÊNCIAS

- Agrawal, K. K., Misra, R., Agrawal, G. D., Bhardwaj, M., and Jamuwa, D. K. (2019). The state of art on the applications, technology integration, and latest research trends of earth-air-heat exchanger system. *Geothermics*, 82:34–50.
- Alves, A. B. M. and Schmid, A. L. (2015). Cooling and heating potential of underground soil according to depth and soil surface treatment in the brazilian climatic regions. *Energy and Buildings*, (90):41–50.
- Ascione, F., Bellia, L., and Minichiello, F. (2011). Earth-to-air heat exchangers for italian climates. *Renewable Energy*, 36:2177–2188.
- Becker, E. B., Carey, G. F., and Oden, J. T. (1981). *Finite Elements An Introduction*. Prentice Hall, New Jersey.
- Bejan, A. (2013). *Convection heat transfer*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Benkert, S., Heidt, F. D., and SchÖler, D. (1997). Calculation tool for earth heat exchangers gaea. In *Proceedings Building Simulation, Fifth International IBPSA Conference 2*, -.
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., and Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- Bisoniya, T. S. (2015). Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy*, 3(18):1–10.
- Bordoloi, N., Sharma, A., Nautiyal, H., and Goel, V. (2018). An intense review on the latest advancements of earth air heat exchangers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89:261–280.
- Brum, R. S., , Isoldi, L. A., Santos, E. D. D., Vaz, J., and Rocha, L. A. O. (2013a). Two-dimensional computational modeling of the soil thermal behavior due to the incidence of solar radiation. *Engenharia Térmica*, 12:63–68.

- Brum, R. S. (2016). *Teoria construtal e desempenho térmico de trocadores de calor solo-ar*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.
- Brum, R. S., Ramalho, J. V. A., Rocha, L. A. O., Isoldi, L. A., and Santos, E. D. (2015). A matlab code to fit periodic data. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, 7:16–25.
- Brum, R. S., Ramalho, J. V. A., Rodrigues, M. K., Rocha, L. A. O., Isoldi, L. A., and Santos, E. D. (2019). Design evaluation of earth-air heat exchangers with multiple ducts. *Renewable Energy*, 135:1371–1385.
- Brum, R. S., Rocha, L. A. O., Vaz, J., Santos, E. D. D., and Isoldi, L. A. (2012). Development of simplified numerical model for evaluation of the influence of soil-air heat exchanger installation depth over its thermal potential. *International Journal of Advanced Renewable Energy Research*, 1(9):505–514.
- Brum, R. S., Rocha, L. A. O., Vaz, J., Santos, E. D. D., and Isoldi, L. A. (2013b). A new computational modeling to predict the behavior of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 1(64):395–402.
- Campos, R. A., Nascimento, L. R., and Rüther, R. (2020). The complementary nature between wind and photovoltaic generation in Brazil and the role of energy storage in utility-scale hybrid power plants. *Energy Conversion and Management*, 221(113160):1–13.
- Chapra, S. C. and Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros*. Mc Graw Hill, México.
- Domingues, A. M. B., Nóbrega, E. S. B., Ramalho, J. V. A., Brum, R. S., and Quadros, R. S. (2021). Parameter analysis of earth-air heat exchangers over multi-layered soils in south Brazil. *Geothermics*, 93:1–14.
- Dominguez, A. M., Nóbrega, E. S., Ramalho, J. V., Brum, R. S., and Quadros, R. S. (2020). Towards earth-air heat exchangers in pellets. In *Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas - ENCIT2020*, Ribeirão Preto, Brazil.
- Estrada, E., Labat, M., Lorente, S., and Rocha, L. A. O. (2018). The impact of latent heat exchanges on the design of earth air heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 129:306–317.
- GERALD, C. F. and WHEATLEY, P. O. (1990). *Applied Numerical Analysis*. Addison-Wesley, New York.
- Geuzaine, C. and Remacle, J.-F. (2020). Gmsh.

Gonzalez, O. and Stuart, A. M. (2008). *A First Course in Continuum Mechanics*. Cambridge University Press, New York.

Hassanzadeh, R., Darvishyadegari, M., and Arman, S. (2018). A new idea for improving the horizontal straight ground source heat exchangers performance. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 25:138–145.

Hermes, V. F., Ramalho, J. V. A., Rocha, L. A. O., dos Santos, E. D., Marques, W. C., Costi, J., Rodrigues, M. K., and Isoldi, L. A. (2020). Further realistic annual simulations of earth-air heat exchangers installations in a coastal city. *ELSEVIER - Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 37.

Hughes, T. J. R. (1987). *The finite element method (Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis)*. Prentice Hall, INC., New Jersey.

Hunt, J. D., Stilpen, D., and Freitas, M. A. V. (2018). A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88:208–222.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S. (2008). *Fundamentos de Transferencia de Calor e Massa*. LTC - Livros Técnicos e científicos Editorial Ltda, Rio de Janeiro.

Logg, A., Mardal, K. A., and Wells, G. N. (2012). *Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method*. Springer, Berlin.

MATLAB (2010). *version 7.10.0 (R2010a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.

Mihalakakou, G., Souliotis, M., Ppadaki, M., Halkos, G., Paravantis, J., Makridis, S., and Papaefthimiou, S. (2022). Applications of earth-to-air heat exchangers: A holistic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 155:1–24.

Nóbrega, E. S., Brum, R. S., Ramalho, J. V., and Quadros, R. S. (2020). First study on earth-air heat exchanger in pelotas. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, 5(6):286–01–286–15.

Ozgener, O., Ozgener, L., and Tester, J. W. (2013). A practical approach to predict soil temperature variations for geothermal (ground) heat exchangers applications. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62:473–480.

Özisik, M. N. (1993). *Heat Conduction*. John Wiley & Sons, New York.

Paepe, M. D. and Janssens, A. (2003). Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 35:389–397.

Papakostas, T., Tsamitros, A., and Martinopoulos, G. (2019). Validation of modified one-dimensional models simulating the thermal behavior of earth-to-air heat exchangers-comparative analysis of modelling and experimental results. *Geothermics*, 82:1–6.

Pires, M. and Querol, X. (2004). Characterization of candiota (south brazil) coal and combustion by-product. *International Journal of Coal Geology*, 60:57–72.

Platts, A. B., Cameron, D. A., and Ward, J. (2015). Improving the performance of ground coupled heat exchangers in unsaturated soils. *Energy and Buildings*, (104):323–335.

Quarteroni, A. and Valli, A. (1997). *Numerical approximations of partial differential equations*. Springer-Verlag, USA.

Rodrigues, M. K., Coswig, F. S., Camargo, K. R., Isoldi, L. A., Brum, R. S., Ramalho, J. V. A., Vaz, J., Rocha, L. A. O., and Santos, E. D. (2018). Thermal performance simulations of earth-air heat exchangers for different soils of a coastal city using in-situ data. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 30:224–229.

Rodrigues, M. K., Souza, J. A., Junior, I. C. A., Brum, R. S., Vaz, J., Rocha, L. A. O., Santo, E. D., and Isoldi, L. A. (2015). Estudo numérico da influência de condições de contorno na modelagem computacional de trocador de calor solo-ar. *Scientia Plena*, 11.

Sembay, R. (2021). Pesquisa pioneira no Brasil propõe o uso de energia do solo para climatizar edifícios. <https://arayara.org/pesquisa-pioneira-no-brasil-propoe-o-uso-de-energia-do-solo-para-climatizar-edific> [Acessado online em Setembro de 2021].

Thomas, G. B. (2015). *Cálculo : Volume 2*. Springer, Pearson.

Vaz, J. (2011). *Estudo experimental e numérico sobre o uso do solo como reservatório de energia para o aquecimento e resfriamento de ambientes edificadas*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil.

Vaz, J., Sattler, M. A., Santos, E. D., and Isoldi, L. A. (2011). Experimental and numerical analysis of an earth-air heat exchanger. *Energy and Buildings*, 43:2476–2482.

Vitoria, L. C., Vaz, I. S., Rocha, L. A. O., Santos, E. D. D., Rodrigues, M. K., and Isoldi, L. A. (2020). Study about the soil temperature stabilization time in an earth-air heat exchanger computational modeling. In *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT2020*, Rio de Janeiro, Brazil.

Análise de desempenho de trocadores de calor solo-ar aletados com materiais galvanizados – Nibia Raquel Navarro Pastor



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Instituto de Física e Matemática

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática



Dissertação

Análise de desempenho de trocadores de calor solo-ar aletados com materiais galvanizados

NIBIA RAQUEL NAVARRO PASTOR

Pelotas, 2022